

MISTURAS BETUMINOSAS – DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS PARA O CÁLCULO DOS PAVIMENTOS

ÓSCAR MIGUEL MOREIRA LOPES

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

Orientador: Professor Doutor Jaime Manuel Queirós Ribeiro

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

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

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

À memória da minha avó Glória.
Agradeço muito, aos meus Pais e à Susana todo o apoio e força incondicional.

A vida não se aprende só nos livros

Eduardo Sá

AGRADECIMENTOS

A dissertação realizada, enquadra-se no âmbito do curso de Mestrado Integrado em Engenharia Civil (MIEC) da Faculdade de engenharia da Universidade do Porto.

A minha gratidão é dirigida ao Professor Doutor Jaime Queirós Ribeiro, da FEUP. Obviamente por ter aceite coordenar o trabalho, e além disso, por toda a disponibilidade, pela orientação de informação, pelas sugestões e por toda a compreensão que demonstrou para comigo na concretização do mesmo.

RESUMO

Este trabalho tem como objectivo primordial, estudar as características das misturas betuminosas e a sua interligação nos métodos de dimensionamento de pavimentos que actualmente se aplicam no nosso país. Como tal, inicialmente tornou-se necessário fazer uma descrição das tipologias existentes de pavimentos rodoviários, com particular destaque para a constituição dos do tipo flexível.

Para a determinação de tais características, é indiscutível ter que se atender à interferência das solicitações que o pavimento sofre ao longo do período que está em serviço. Analisou-se a forma como se considera o efeito do tráfego, através da contagem do número de cargas eixos-padrão, e da temperatura, nomeadamente com o estabelecimento de uma temperatura de serviço

De forma a que o dimensionamento de pavimentos seja feito correctamente e seja evitada a sua ruína prematuramente, é necessário limitar o valor das extensões que são responsáveis pela rotura por fadiga e por deformação permanente. Deste modo, é importante compreender-se o comportamento mecânico dos pavimentos (fundamentalmente com o conhecimento do módulo de deformabilidade), fazer-se uma caracterização adequada dos constituintes da mistura betuminosa (ligante e agregado) e analisar-se qual dos vários métodos de formulação de misturas é mais ajustado a cada caso específico, ponderando vantagens e desvantagens de cada um deles.

No final do trabalho, pretendeu-se exhibir os passos e cálculos necessários à realização de um dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos flexíveis, com base nos métodos da Shell e da Universidade de Nottingham.

PALAVRAS-CHAVE: Dimensionamento de Pavimentos, Misturas Betuminosas, Módulos de Deformabilidade, Fadiga, Deformação Permanente.

ABSTRACT

This dissertation has as main objective to study the characteristics of the bituminous mixtures and its interconnections in the methods of sizing of pavements that actually are applied in Portugal. Therefore, at the start it was necessary to make a description of the current typologies of roads pavements, with particular relevance for the constitution of flexible ones.

For the determination of those characteristics, it is indisputable the influence of the solicitations that are applied in the pavements over the years. It was analysed the way the traffic congestion influence this phenomenon, through the counts of the number of solicitations axis-pattern, of the temperature, namely with the attribution of a service temperature.

In order to achieve an accurate sizing of the pavements and to avoid its premature ruin, it is necessary to limit the value of the extensions that are responsible for the rupture by fatigue and by permanent deformation. This way, it is essential to understand the mechanic behaviour of the pavements (mainly with the knowledge of the module of deformability), to make a characterization of the constituents of the bituminous mixture (binder and aggregate) and to analyse which of the several formulation methods of mixtures are appropriated to each specific case, balancing advantages and disadvantages of each one.

In the end of dissertation, it was pretended to expose the steps and the calculations needed for the realization of an empiric-mechanic sizing of flexible pavements, with the support of the Shell method and of the University of Nottingham.

KEYWORDS: Sizing of pavements, Bituminous mixtures, Modules Deformability, Fatigue, Permanent Deformation

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJECTIVOS.....	2
2. TIPOLOGIA DE PAVIMENTOS.....	3
3. SOLICITAÇÕES.....	7
3.1. INTRODUÇÃO	7
3.2. TRÁFEGO.....	7
3.3. TEMPERATURA.....	11
4. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE MISTURAS BETUMINOSAS	15
5. CRITÉRIOS DE RUÍNA.....	19
5.1. INTRODUÇÃO	19
5.2. FADIGA	19
5.3. DEFORMAÇÃO PERMANENTE.....	20
5.4. RUÍNA EM PAVIMENTOS RÍGIDOS E SEMI-RÍGIDOS	21
6. MISTURAS BETUMINOSAS.....	23
6.1. INTRODUÇÃO	23
6.2. LIGANTE.....	23
6.3. AGREGADOS	29
6.4. FUNÇÕES DOS COMPONENTES.....	30
6.5. PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS.....	32

6.6. TIPOS DE MISTURAS BETUMINOSAS	34
6.7. FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS	35
7. CRITÉRIOS DE RUÍNA	43
7.1. INTRODUÇÃO	43
7.2. DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO-MECANICISTA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS	44
7.3. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ATRAVÉS DE MÉTODOS MAIS EXPEDITOS	57
8. BIBLIOGRAFIA	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.1 – Constituição tipo de um pavimento rodoviário flexível.....	4
Fig.2 – Distribuição horária oficial em Portugal Continental, do tráfego de pesados, em percentagem do TMD, para a rede nacional.....	10
Fig.3 – Esquemática geralmente adoptada para a acção de um eixo-padrão sobre o pavimento..	10
Fig.4 – Temperatura de serviço de camadas betuminosas (Shell).....	11
Fig.5 – Temperatura média mensal do ar (Shell).....	12
Fig.6 – Resposta a tensão vertical de carga rolante.....	15
Fig.7 – Fendilhamento tipo “pele de crocodilo” num pavimento	20
Fig.8 – Deformações permanentes tipo rodeira num pavimento	21
Fig.9 – Estrutura tipo das fracções de asfaltenos, aromáticos e saturados dum betume	25
Fig.10 – Esquema representativo do ensaio de penetração	26
Fig.11 – Ensaio para determinação do ponto de amolecimento pelo método anel e bola	27
Fig.12 – Diagrama BTCD: viscosidades “ideais” para a mistura e compactação de misturas betuminosas	28
Fig.13 – Composição volumétrica dum mistura betuminosa	31
Fig.14 – Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa.....	31
Fig.15 – Equipamento utilizado no ensaio de Marshall e esquema do resultado tipicamente obtido ...	41
Fig.16 – Gráficos dos valores médios obtidos para cada teor de betume, relativos às variáveis estudadas no Método de Marshall	41
Fig.17 – Procedimento típico de dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos flexíveis	44
Fig.18 – Ábaco de Van der Poel para a determinação da rigidez do betume	46
Fig.19 – Ábaco para a previsão do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, segundo o manual de dimensionamento da Shell	48
Fig.20 – Variação do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas com a rigidez do betume, para as classes S1 e S2 do manual de dimensionamento da Shell	50
Fig.21 – Nomogramas para previsão do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas.....	51
Fig.22 – Nomograma para determinação da vida à fadiga dum mistura betuminosa	54
Fig.23 – Nomograma para a previsão do desempenho à fadiga de misturas betuminosas em ensaios laboratoriais	55

ÍNDICE DE QUADROS (OU TABELAS)

Quadro 1 – Caracterização do tráfego pelo MACOPAV	9
Quadro 2 – Valores horários oficiais em Portugal Continental da percentagem, em relação ao TMD de pesados	10
Quadro 3 – Variáveis que afectam as misturas betuminosas.....	33
Quadro 4 – Designação das misturas betuminosas	35
Quadro 5 – Vantagens e desvantagens dos vários métodos de formulação de misturas betuminosas.....	38
Quadro 6 – Fusos granulométricos para misturas betuminosas	42

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A – Área de contacto de uma roda com o pavimento

Emist – Módulo de deformabilidade da mistura betuminosa

E – Módulo de deformabilidade

E1 – Parte real ou elástica do módulo complexo

E2 – Parte imaginária ou viscosa do módulo complexo

Ef – Módulo de deformabilidade da fundação

Eg – Módulo de deformabilidade das camadas granulares

E* – Módulo complexo

f – Coeficiente de equivalência entre o dano no pavimento provocado pela passagem de um eixo-padrão e o dano provocado por um eixo de peso P

fr – Factor de indução de assentamento

IP – Índice de penetração dum betume

N – Tráfego acumulado ao longo do período de vida de um pavimento

N₈₀ – Número de eixos-padrão de 80KN que solicitam o pavimento durante a sua vida útil

Na – Número máximo admissível de passagens do eixo-padrão

Np – Número de eixos-padrão de carga p que solicitam o pavimento durante a sua vida útil

n – número de anos de vida de um pavimento

P – Carga do rodado dum veiculo

p – Pressão de um pneu de um veiculo

pen₂₅ – Penetração a 25 °C dum betume asfáltico

Sb – rigidez do betume

T – temperatura de serviço dum material

TAB – Temperatura de amolecimento dum betume asfáltico determinada pelo método do anel e bola

t – Variável genérica tempo

t – Taxa de crescimento anual do tráfego de pesados

t – Tempo de carregamento

VMA – Volume de vazios no esqueleto de agregado

v – Velocidade média da corrente de tráfego pesado

v_a – percentagem volumétrica de agregados numa mistura betuminosa

v_b – Percentagem volumétrica de betume numa mistura betuminosa

W – Frequência angular de carregamento

α – Coeficiente de agressividade, factor de equivalência de danos entre veiculo pesado e eixo-padrão

ε – Extensão

σ – Tensão

ε_t – Extensão horizontal de tracção na parte inferior das camadas betuminosas

ε_z – Extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação

ϕ – Ângulo de fase

ν – Coeficiente de Poisson

AASHO – American Association of State Highways Officials

ARRB – Australian Road Research Board

BBr – Betão Betuminoso rugoso

BTCD – Bitumen Test Data Chart

CBR – Californian Bearing Ratio

CPA – Coeficiente de Polimento Acelerado

EP – Estradas de Portugal

JAE – Junta Autónoma de Estradas

LCPC – Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

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

MB – Macadame Betuminoso

NP – Norma Portuguesa

NP EN – Norma harmonizadas

Npes – Número de veículos pesados

PATED – Processo de distribuição de temperatura equivalente

PAVIFLEX – Programa de cálculo automático para dimensionamento de pavimentos flexíveis

PETE – Processo de temperatura equivalente

PGC – Prensa Giratória de Corte

SHRP – Strategic Highway Research Program

TMMA – Temperatura Média Mensal do Ar

TMDA₁ – Tráfego médio diário anual de pesados no ano de abertura ao tráfego

TMDAp – Tráfego médio diário anual de pesados

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

A mobilidade de pessoas e de produtos, proporcionada pela evolução das vias rodoviárias tem, cada vez mais, uma contribuição importante no desenvolvimento económico e conseqüentemente no desenvolvimento social e cultural de qualquer sociedade. Na rede rodoviária nacional tem-se vindo a verificar um incremento da intensidade do tráfego que a solicita, sendo esta constituída principalmente por pavimentos flexíveis, cujo comportamento é altamente dependente do funcionamento das misturas betuminosas e dos materiais granulares que os constituem. Uma vez que actualmente é exigida uma maior qualidade dos pavimentos, em termos de segurança e comodidade, é fundamental o aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento e a melhoria do comportamento das misturas betuminosas. Por isso mesmo, é essencial conhecer os factores que afectam o desempenho deste tipo de pavimentos, através do estudo/análise das propriedades mecânicas e de deformabilidade das camadas betuminosas e o modo de quantificar e qualificar os esforços resultantes das acções sobre a estrutura.

O comportamento e a capacidade resistente dos materiais dos pavimentos, que diminui ao longo do tempo, dependem de dois tipos de factores: os “activos” são directamente responsáveis pela deterioração do pavimento, destacando-se aqui a acção do tráfego e do clima; e os “passivos”, como a qualidade de produção das misturas ou a qualidade de construção do pavimento, que influenciam a eficiência de retardamento da referida degradação.

A quantificação do tráfego é feita a partir de um coeficiente de agressividade do tráfego de pesados, permitindo o cálculo do número de eixos-padrão. Neste cálculo considera-se uma determinada taxa de crescimento dos veículos pesados para prever a sua totalidade num determinado período de dimensionamento. É indispensável, por outro lado, ter também em conta o efeito das condições climáticas, principalmente da temperatura, pois delas são dependentes as propriedades mecânicas observadas num pavimento.

Até se atingir o estado de conhecimento actual, os métodos de dimensionamento baseavam-se apenas em ensaios físicos com vista à classificação de solos. Mais tarde começaram a ser realizados ensaios mecânicos de resistência, destacando-se o método do CBR na determinação da capacidade de suporte da fundação. A teoria de rotura por corte foi utilizada no cálculo de espessuras do pavimento, mas foi a partir da limitação da deflexão do pavimento que se deu a passagem dos métodos designados empíricos, para os métodos empírico-mecanicistas. Aqui, a definição dum limite para a deflexão não impede que as tensões e extensões admissíveis pelos materiais que constituem os pavimentos sejam ultrapassadas.

Os métodos empírico-mecanicistas têm por base, critérios de controlo de extensões (critérios de dimensionamento), geralmente através do estabelecimento dum valor admissível para as mesmas. Actualmente os critérios de ruína/dimensionamento habitualmente utilizados são o critério de fadiga e o critério de deformação permanente, que são a base de comparação dos resultados obtidos da análise de tensões e deformações, determinando se um pavimento está ou não bem dimensionado. Dada a sua maior utilização actual e conhecimento em Portugal, podem destacar-se o Método da Shell e o método da Universidade de Nottingham.

Igualmente importante, de modo a garantir um comportamento adequado das misturas betuminosas e consequentemente assegurando as propriedades mínimas exigíveis às condições a que vão ser sujeitas, é necessário caracterizar inicialmente os seus componentes (agregado e ligante betuminoso) e sobretudo, estudar a sua composição recorrendo a métodos de formulação.

Em Portugal, registou-se ao longo dos últimos vinte anos um forte investimento na construção rodoviária. Estando concluída grande parte da rede rodoviária nacional planeada, tem-se vindo a observar um natural abrandamento na construção de novas estradas e um aumento das despesas de conservação e reabilitação das estradas em serviço. A conservação de pavimentos tem por objectivo manter e/ou otimizar a qualidade dos mesmos ao longo do seu período de vida. É efectuado nas situações em que há sintomas de mau comportamento futuro, sem que exista porém, previsão de começo de ruína a curto prazo. Pretende-se portanto, a manutenção de um nível de serviço que ofereça ao utente as melhores condições de circulação. Procede-se por outro lado à reabilitação, quando o pavimento deixou de oferecer a qualidade de serviço esperada e está a iniciar um estado de ruína. O objectivo passa por promover uma melhoria das suas características (essencialmente estruturais), face a novas solicitações para um novo período de vida, nomeadamente com um tráfego mais elevado que o considerado para o período anterior. O reforço de pavimentos, constitui assim, uma técnica de conservação baseada na reabilitação e reposição da capacidade estrutural do pavimento. Quando o reforço é aplicado sobre pavimentos fendilhados, ocorre normalmente um mecanismo de rotura caracterizado pela propagação das fendas do pavimento existente para as camadas de reforço, designado por reflexão de fendas. Este fenómeno, constitui uma das principais causas do fendilhamento prematuro dos reforços de pavimentos, e deve-se sobretudo à elevada concentração de tensões na zona acima das fendas das camadas existentes. Tensões essas, que são provocadas pelos movimentos dos bordos das fendas, resultantes da acção do tráfego e das variações de temperatura. Ao longo deste trabalho não será feita uma análise das técnicas ou processos de conservação e reabilitação. No entanto, fica aqui esta referência, pois é certo que no futuro este tema terá cada vez maior relevância e interesse.

1.2. OBJECTIVOS

Com este trabalho, os objectivos primordiais que se pretendem alcançar são os seguintes: analisar as características das misturas betuminosas, avaliar a influência das acções da temperatura e da aplicação de cargas impostas pelos veículos e descrever o modo como se efectua o dimensionamento de pavimentos flexíveis.

2

TIPOLOGIA DE PAVIMENTOS

Um pavimento é considerado como um sistema laminar, formado por várias camadas de espessura constante constituídas por diferentes materiais, apoiados numa fundação, constituída pelo terreno natural (maciço semi-infinito), ao qual se pode melhorar a qualidade com a realização de um coroamento (leito do pavimento).

Essencialmente os pavimentos desempenham as seguintes funções:

- Funções estruturais – resistir ou reduzir as solicitações que são alvo, para níveis compatíveis com a resistência da estrutura;
- Funções funcionais – criar uma superfície regular, com suficiente rugosidade e resistência ao desgaste, de modo a garantir segurança, economia e comodidade de circulação.

Consoante os materiais, e a sequência de camadas que constituem os pavimentos, estes podem dividir-se em: flexíveis, rígidos ou semi-rígidos.

Os **pavimentos flexíveis** apresentam as camadas superiores formadas por misturas betuminosas (materiais estabilizados com ligantes hidrocarbonados, normalmente o betume asfáltico) e inferiormente uma ou várias camadas de material granular.

Caracterizam-se por deflexões elevadas em áreas relativamente restritas, fazendo intervir muito intensamente as camadas superficiais do terraplano, o que determina cuidados acrescidos a nível do leito do pavimento. Oscilam entre os “puramente flexíveis”, nos quais predominam as bases granulares estabilizadas por meios mecânicos, limitando-se a degradar a solicitação para níveis compatíveis com as características da infra-estrutura, e os “mediamente flexíveis”, que integram uma significativa espessura em camadas estabilizadas com ligantes betuminosos, proporcionando assim uma degradação de cargas mais eficaz e uma certa resistência à tracção na flexão.

Os **pavimentos rígidos** são constituídos superiormente por uma laje de betão de cimento (material granular estabilizado com ligantes hidráulicos, normalmente o cimento Portland), apoiado numa camada de material granular, ou no caso de tráfego intenso, por material granular estabilizado com ligante hidráulico (betão pobre ou solo cimento). Caracterizam-se por deflexões muito reduzidas em áreas relativamente grandes, fazendo intervir camadas bastante extensas do terraplano. A elevada resistência deste tipo de pavimentos, devida à resistência à flexão do betão de cimento, faz com que eles não sofram deformações acentuadas mesmo para condições severas de tráfego e temperaturas elevadas, sendo as tensões geradas no solo de fundação meramente residuais.

Os **pavimentos semi-rígidos** apresentam características comuns aos dois tipos anteriores. Integram uma ou mais camadas estabilizadas com ligantes hidráulicos, mas com características mecânicas que

não lhes permite a resposta adequada à acção do tráfego previsível. Podem-se dividir em dois sub-tipos: os tradicionais ou directos e os inversos. Nos primeiros é colocada uma camada de mistura betuminosa sobre o material estabilizado com cimento, eventualmente com intercalação de uma interface retardadora da propagação de fissuras. Nos segundos, coloca-se uma base em material de granulometria extensa estabilizado com meios mecânicos directamente sobre o material ligado, geralmente com cimento numa espessura de cerca de 12 centímetros, antecedendo a aplicação das camadas de ligação e de desgaste.

Em função dos objectivos deste trabalho e dado que a maior parte da extensão da rede rodoviária portuguesa é formada por pavimentos flexíveis, a este tipo de pavimentos será dado naturalmente primordial relevo.

A sua constituição assenta num conjunto de camadas superiores, realizadas com misturas betuminosas, constituídas por uma camada de desgaste, uma camada de ligação e uma camada de base, sendo esta, o principal elemento estrutural do pavimento. Inferiormente, é formado por um conjunto de camadas realizadas com materiais granulares não ligados (ou seja, estabilizados mecanicamente) que formam uma camada de base e uma sub-base granulares. A constituição deste tipo de pavimentos pode ser melhor elucidada através da figura 1:

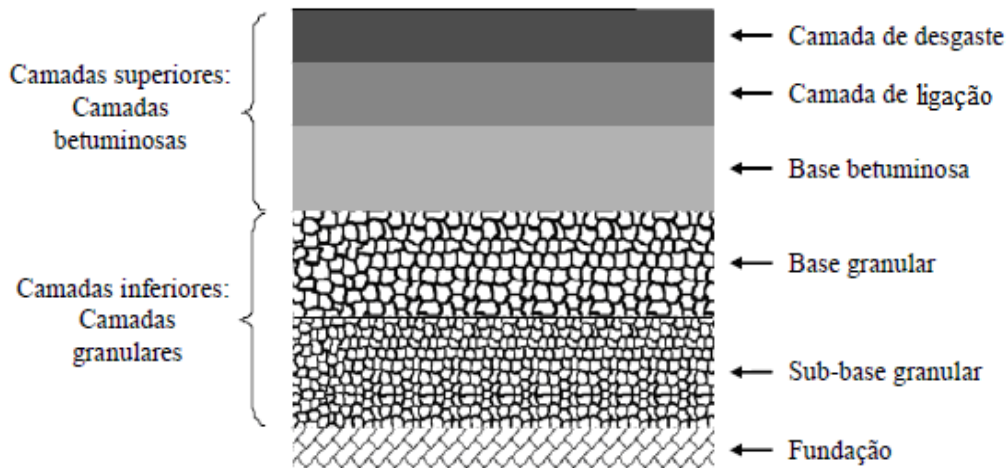


Fig.1 – Constituição tipo de um pavimento rodoviário flexível

A camada de desgaste, é a camada superior do pavimento e portanto tem a função de resistir à acção directa do tráfego e do clima, assumindo todas as funções funcionais. Além de proteger as camadas inferiores das acções climáticas, contribui para a resistência global da estrutura.

A ligação entre a camada de desgaste e a camada de base é efectuada através de uma camada, designada justamente, de camada de ligação. Eventualmente pode também existir uma camada de regularização, de espessura variável, aplicada sobre uma camada ou superfície já existente para obtenção do perfil necessário à colocação de uma outra camada de espessura constante. Acrescente-se que, esta também contribui para a resistência global da estrutura.

A base betuminosa ou granular, tem essencialmente uma função estrutural, de redução das pressões verticais, diminuindo as tensões de compressão na sub-base.

A sub-base granular tem a função de diminuir as tensões de compressão na fundação. Além disso, permite que o solo de fundação seja capaz de suportar a circulação em obra, ao reduzir as tensões no solo de fundação e ao homogeneizar as características mecânicas da superfície de circulação.

3

SOLICITAÇÕES

3.1. INTRODUÇÃO

A constituição do pavimento, no que diz respeito ao número e espessura de camadas e tipos de materiais utilizados, para além de ser influenciada pelas características da fundação, depende sobretudo das acções do tráfego e da temperatura que se exercem sobre o pavimento durante o seu período de vida. Estas solicitações têm um efeito fundamental no funcionamento do pavimento e merecem por isso uma análise de destaque.

Quanto às acções do tráfego, que resultam da aplicação das cargas dos veículos, podem ser traduzidas por uma pressão vertical uniforme e aplicada numa área considerada circular, na superfície do pavimento e por uma acção tangencial aplicada no plano entre o pneu e o pavimento, que corresponde á reacção necessária para o movimento do veículo e às reacções que ocorrem durante as frenagens. A intensidade e a forma de aplicação das cargas dos veículos definem determinados comportamentos do pavimento, especialmente pelos materiais (em particular os betuminosos) terem comportamentos que variam com o modo como são solicitados.

Quanto às acções climáticas, representadas pela temperatura e pela água, também têm uma influência relevante no comportamento e evolução do pavimento e consequentemente no seu dimensionamento. A temperatura do ar, a radiação solar e a velocidade do vento à superfície do pavimento, determinam em cada instante a temperatura das camadas betuminosas, o que condiciona o seu módulo de deformabilidade (variando esta última no sentido inverso da temperatura). O teor em água, com origem na própria fundação ou proveniente do exterior através da superfície do pavimento, tem interferência ao nível da resistência. No entanto, refira-se que relativamente às camadas granulares, a acção da água não é tão importante caso haja um correcto sistema de drenagem.

Será feita agora uma análise mais específica das acções que se tem vindo a falar, especialmente quanto à forma como interferem nos cálculos e na lógica de dimensionamento.

3.2. TRÁFEGO

Para efeitos de dimensionamento, das onze classes definidas pela JAE só é considerado o efeito do tráfego de veículos pesados, que correspondem às classes F, G, H, I, J e K. Isto porque as cargas descarregadas por eixo dos veículos ligeiros têm um efeito desprezável. As cargas por eixo dos veículos pesados dependem do tipo de veículo e do tipo de carga, determinando assim uma grande diversidade de estados de tensão e deformação instalados no pavimento. Para a resolução deste “problema”, foi extremamente importante o ensaio AASHO realizado já nos anos 50 do século XX.

Com a sua realização, pôde constatar-se uma relação entre os efeitos destrutivos dos eixos com diferentes cargas, que pode ser representado pela expressão:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^x = f \quad (1)$$

Em que N_1 é o número de passagens de um eixo simples de carga P_1 , que provoca o mesmo dano ao de N_2 passagens de um eixo simples de carga P_2 e f é o coeficiente de equivalência entre eixos e exprime o número de passagens do eixo P_1 que provoca o mesmo dano que uma passagem do eixo P_2 . Para pavimentos flexíveis o valor do expoente “ x ” é aproximadamente 4 e no caso de pavimentos semi-rígidos e rígidos pode variar entre 11 e 33.

Este ensaio, permitiu concluir que se tivermos os dados relativos às cargas dos eixos e os respectivos números de passagens dos diversos veículos que solicitam o pavimento durante a sua vida útil (período para o qual é dimensionado), de modo a facilitar os cálculos necessários ao estudo da acção do tráfego no dimensionamento, é possível transformar toda uma multiplicidade e desigualdade de passagens de veículos, num número equivalente de passagens de um único eixo simples, de carga arbitrariamente escolhida, designado por **eixo-padrão**.

Em Portugal, para pavimentos flexíveis, normalmente utiliza-se como eixo padrão, 80 kN. Já por exemplo em França ou Espanha é considerado o valor de 130 kN e quanto à vida útil, desde o ano de abertura até ao ano horizonte, esta é considerada de 20 anos para pavimentos flexíveis e semi-rígidos, e de 30 anos no mínimo, no que diz a respeito aos pavimentos rígidos.

Para efeitos de dimensionamento, o número de veículos pesados que solicitam a estrada durante a sua vida útil, é determinado por meio de estudos de previsão de tráfego. Estes estudos incluem por exemplo, a avaliação do tráfego existente na região com interesse para a estrada em estudo e prevêem o tráfego que a nova estrada irá captar e a sua evolução futura até ao fim da vida útil.

Com estes dados é possível a criação de modelos que fornecem o tráfego médio diário anual (TMDA_p) de veículos pesados em cada ano da sua vida e a correspondente taxa de crescimento anual do tráfego de pesados (t). Assim, conseqüentemente é possível calcular o somatório do número de veículos pesados que solicitam o pavimento durante o número n de anos da vida útil (N_{pes}).

$$N_{pes} = TMDA_p \frac{(1+t)^n - 1}{t} \times 365 \quad (2)$$

A via que se dimensiona, é normalmente designada por “via de projecto”. Para este efeito considera-se em geral que o tráfego total se reparte de igual modo pelas duas vias de uma estrada com uma faixa de rodagem e dois sentidos (qualquer das duas vias será “via de projecto”), e que numa estrada com duas faixas de rodagem, uma em cada sentido de duas vias cada. Para estas vias, 45% do tráfego ocupa a via da direita (“via de projecto”) e 5% a via interior.

No nosso país, não era uma tarefa muito facilitada, a correcta avaliação do tráfego de dimensionamento de pavimentos, ou seja, passagens de eixos-padrão, uma vez que a informação do

espectro de cargas dos eixos dos veículos pesados que percorrem o nosso território, não era de simples obtenção. No entanto com o passar do tempo, este “impedimento” tem vindo a ser ultrapassado através de contagens e pesagens de veículos pesados em certos pontos da rede nacional rodoviária. Deste modo, é possível estimar-se o número e cargas médias dos respectivos eixos e consequentemente determinar-se o chamado **“factor de agressividade”** do tráfego que é fundamental para os cálculos necessários à sua avaliação. Habitualmente, a gestão rodoviária, considera que as cargas dos veículos pesados são definidos pelos seus factores de agressividade (α), o mesmo é dizer, pelo número de eixos padrão que representa/equivale a uma passagem de um veículo pesado (associado a uma determinada categoria), ou seja, permite transformar o conjunto de veículos pesados em eixos-padrão.

Até ao melhor desenvolvimento/conclusão de estudos mais recentes aplicados a um maior número pontos de pesagem da nossa rede viária, estes valores podem ser observados no manual definido pela EP “MACOPAV”. Este agrupa o tráfego por classes dependendo dos valores de TMDA pesados na via de projecto, e faz-lhes corresponder um factor de agressividade (expresso em eixos-padrão por veículo pesado) e uma taxa média de crescimento anual.

Quadro 1 – Caracterização do tráfego pelo MACOPAV

Classe	(TMDA) _p	Taxa de crescimento médio (t)	Pavimentos flexíveis		Pavimentos semi-rígidos	
			Factor de agressividade (e.p./v.p.)	N _{dim 80} (20 anos)	Factor de agressividade (e.p./v.p.)	N _{dim 130} (20 anos)
T ₇	< 50		estudo específico			
T ₆	50–150	3		2 x 10 ⁶	0,5	5 x 10 ⁵
T ₅	150–300		3	8 x 10 ⁶	0,6	2 x 10 ⁶
T ₄	300–500	4	4	2 x 10 ⁷	0,7	4 x 10 ⁶
T ₃	500–800		4,5	4 x 10 ⁷	0,8	7 x 10 ⁶
T ₂	800–1200	5	5	7 x 10 ⁷	0,9	10 ⁶
T ₁	1200–2000		5,5	10 ⁸	1,0	2 x 10 ⁷
T ₀	> 2000		estudo específico			

Concluindo, o desejado tráfego acumulado de eixos-padrão de 80KN, durante o período de dimensionamento (N₈₀), é calculado em função do factor de agressividade, do tráfego médio diário anual de pesados, da taxa de crescimento anual do tráfego de pesados e do número de anos de vida útil do pavimento, pela seguinte expressão:

$$N_{80} = N_{pes} \times \alpha \quad (3)$$

No dimensionamento de pavimentos flexíveis é importante ter-se em consideração o efeito simultâneo do tráfego e da temperatura. Como já se verá, nalguns procedimentos, considera-se a distribuição da temperatura ao longo do dia, por isso para as condições portuguesas, existe um modelo simples, que tem em conta a distribuição horária típica do tráfego de pesados (Picado Santos, 1995), permitindo assim a obtenção do “dano” horário em estruturas de pavimento. O modelo é suficientemente validado

e pode ser aplicado directamente em projectos na generalidade do país, como se pode constatar através do programa de cálculo automático PAVIFLEX que será tratado num capítulo mais adiante.

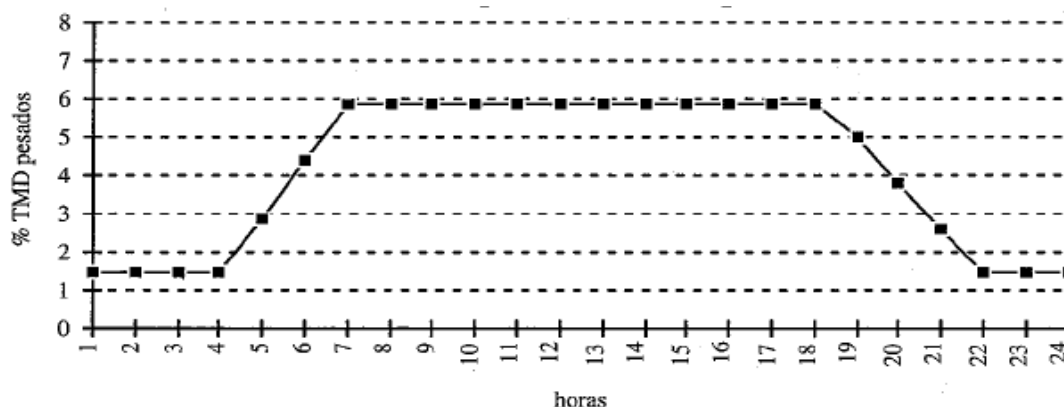


Fig.2 – Distribuição horária oficial em Portugal Continental, do tráfego de pesados, em percentagem do TMD, para a rede nacional (Branco)

Quadro 2 – Valores horários oficiais em Portugal Continental da percentagem, em relação ao TMD de pesados

horas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
%TMD	1,5	1,5	1,5	1,5	2,9	4,4	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
horas	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
%TMD	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,0	3,8	2,6	1,5	1,5	1,5

É igualmente importante fazer uma análise estrutural, quanto a definição da geometria das cargas que actuam no pavimento. O eixo padrão considerado para efeitos de dimensionamento é um eixo simples, tendo em cada extremo um rodado, considerado como tendo duas rodas gémeas afastadas uma da outra à distância L . Considera-se que a área “A” de contacto da roda com o pavimento é circular de raio “r” e que a pressão de contacto “p” é igual à pressão de enchimento das rodas. Conhecida a carga “P” do eixo padrão, cada roda descarrega $P/4$ distribuído por uma área $P/4p$.

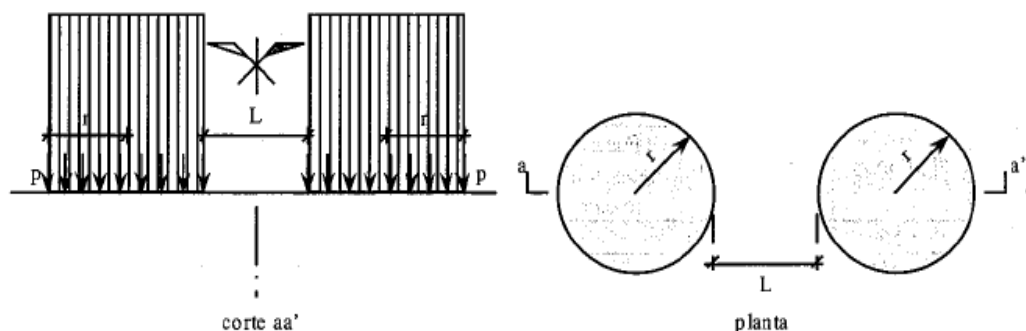


Fig.3 – Esquematização geralmente adoptada para a acção de um eixo-padrão sobre o pavimento (Branco)

Em dois dos métodos de dimensionamento empírico-mecanicista, mais usados em Portugal, Shell e Nottingham (que em capítulo próprio serão estudados) usam-se estas características:

Eixo padrão de 80 kN: Shell L=105 mm; p=0,6 Mpa; r=105mm
 Nottingham L=150 mm; p=0,5 Mpa; r=113mm
 Eixo padrão de 130 kN: L=125 mm; p=0,662 Mpa; r=125mm

3.3. TEMPERATURA

O procedimento mais usual para ter em conta a acção da temperatura para efeitos de dimensionamento, estabelecendo a “temperatura de serviço” é a consideração de uma “temperatura de serviço equivalente anual” para o pavimento.

Por exemplo, no caso do método da Shell, esta temperatura de serviço equivalente anual pode ser determinada num ábaco (figura 4) em função da espessura do pavimento e de uma temperatura do ar equivalente anual (ou temperatura média mensal do ar – TMMA, como se pode observar na figura 5) que por sua vez pode ser determinada através de um factor de transformação aplicado às temperaturas médias mensais do ar (fáceis de aceder em qualquer região), resultantes de estudos probabilísticos e de medições directas envolvendo as temperaturas do ar e temperaturas dos pavimentos.

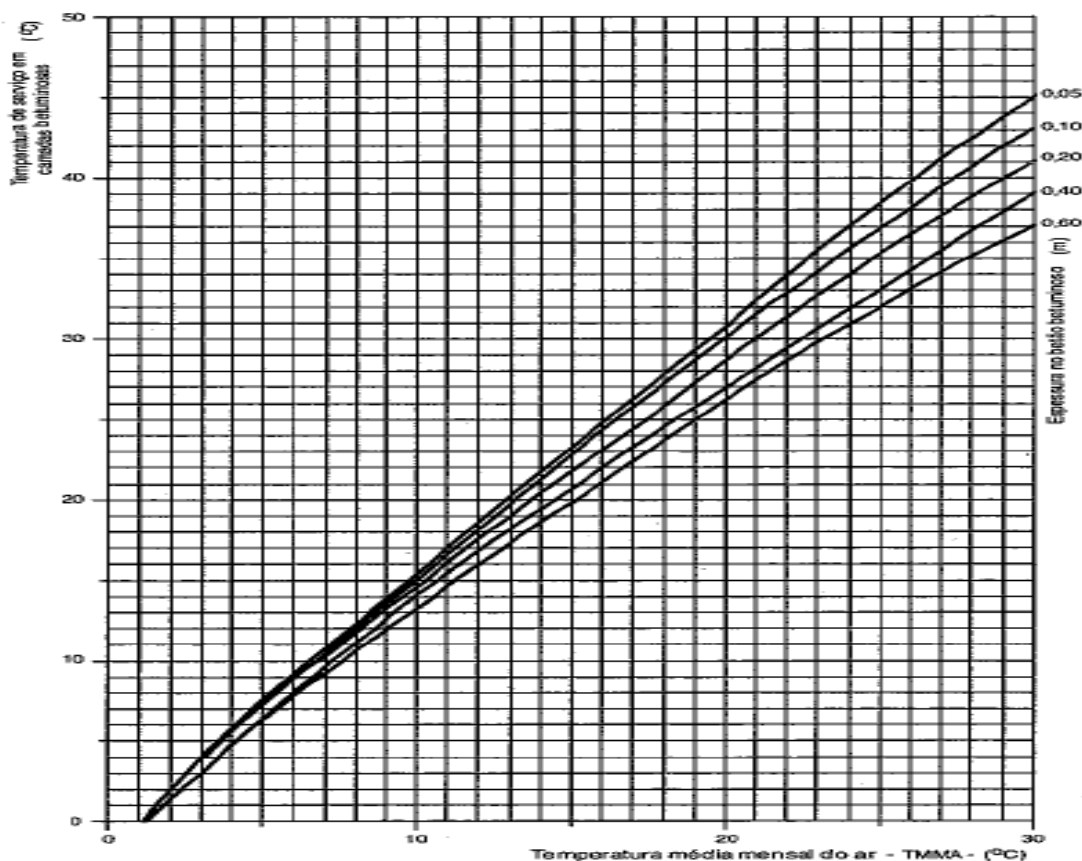


Fig.4 – Temperatura de serviço de camadas betuminosas (Shell, 1977)

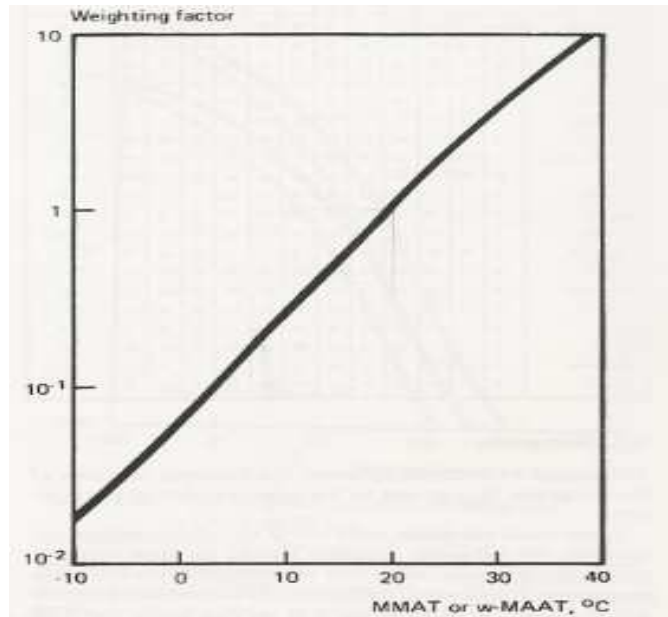


Fig.5 – Temperatura média mensal do ar (Shell)

Relativamente ao método de Nottingham, não se pode dizer que inclua um procedimento aceitável para a consideração do efeito da temperatura na variabilidade de comportamentos que se podem assinalar para as camadas betuminosas. O efeito anterior pode ser traduzido pela adopção de uma temperatura equivalente anual na camada betuminosa para o critério de ruína por fadiga e outra semelhante para o critério de ruína por deformação permanente. A obtenção destas temperaturas é feita multiplicando um factor constante igual a 1,92 para a fadiga e 1,47 para a deformação permanente, pela temperatura média anual do ar, que corresponde à média das temperaturas médias mensais.

A utilização duma temperatura de serviço equivalente anual (ou de um conjunto de temperaturas de serviço equivalentes mensais) tem como objectivo, que a modelação do comportamento das misturas betuminosas no dimensionamento de pavimentos, possa ser equivalente à grande variedade de comportamentos que se pode assinalar num ciclo anual de vida desse pavimento, e que este ciclo anual represente bem os ciclos anuais em que o pavimento esteja em serviço. Pretende além disso, representar a influência que as diferentes temperaturas que ocorrem na realidade a diferentes profundidades nessa camada, têm no comportamento global dum pavimento.

A temperatura ambiente é crucial no que respeita ao comportamento das camadas betuminosas. Este, varia muito com a subida ou descida da temperatura das camadas, sendo que, para uma dada localização geográfica, a temperatura do ar e conseqüentemente das camadas dos pavimentos, variam quase permanentemente. Acresce que, a temperatura das camadas betuminosas depende de outros factores climáticos, tais como a radiação solar e a velocidade do vento à superfície do pavimento, dificultando ainda mais a determinação da chamada temperatura de serviço representativa. Por essa razão, apesar dos modelos de comportamento dos materiais se terem tornado mais sofisticados e complexos, a sua validade está fortemente condicionada pelo rigor que é possível atingir na quantificação das acções, designadamente do efeito da temperatura.

Torna-se então relevante, tentar estabelecer com maior “precisão” tanto o tráfego como a temperatura, para que se possa melhorar a sua consideração no desempenho das misturas betuminosas e conseqüentemente tentar melhorar a fiabilidade dos resultados de qualquer processo de dimensionamento. No seguimento do que se referiu atrás em relação a distribuição horária do tráfego,

é desta forma importante conhecer a temperatura de serviço de cada hora dum ciclo anual. Assim, para se ter a possibilidade de modelar, o mais aproximadamente possível, uma temperatura representativa para as camadas betuminosas, foram desenvolvidos dois métodos de utilização simples (Picado Santos 1995), chamados de: “processo de temperatura equivalente”, aqui a modelação das temperaturas horárias a diferentes profundidades nas camadas betuminosas é efectuada através da distribuição horária dum temperatura equivalente mensal, para todo o conjunto dessas camadas; e o “processo de distribuição de temperatura equivalente”, onde foi efectuada uma modelação da distribuição horária dum temperatura mensal para cada profundidade nas camadas betuminosas. Estes dois métodos podem ser aplicados no programa de cálculo automático PAVIFLEX (Baptista, 1999).

4

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DAS MISTURAS BETUMINOSAS

Regra geral, o estudo do comportamento mecânico das misturas betuminosas é feito em laboratório, realizando ensaios que permitam determinar as características de deformabilidade das misturas. O conhecimento de tais propriedades mecânicas, assume particular importância, quer a nível da sua formulação, quer a nível de dimensionamento de pavimentos flexíveis.

As camadas betuminosas, condicionadas pelo comportamento do betume asfáltico, exibem a temperaturas baixas um comportamento elástico, a temperaturas elevadas um comportamento viscoso e a temperaturas intermédias um comportamento mais representativo das condições de serviço, o visco-elástico.

Os materiais constituintes das camadas dos pavimentos rodoviários flexíveis, designadamente, as misturas betuminosas e os materiais não ligados (camadas granulares e solo de fundação), exibem um comportamento não linear e não elástico. Em geral, é aceite que as misturas betuminosas apenas exibem comportamento próximo do elástico linear para temperaturas abaixo dos 15°C. No entanto, o comportamento elástico linear dos materiais, devido à sua simplicidade e facilidade de utilização na análise de tensões e deformações, é correntemente adoptado no dimensionamento de pavimentos flexíveis para toda a gama de temperaturas de serviço.

Considerando um comportamento elástico linear na análise estrutural de pavimentos flexíveis, cada um dos materiais é caracterizado pelo módulo de deformabilidade e pelo coeficiente de Poisson.

Na prática, as camadas que constituem a estrutura dum pavimento flexível estão sujeitas às cargas rolantes dos veículos, o que se traduz em leis de variação com o tempo, da tensão e da extensão, com um andamento semelhante ao representado na figura:

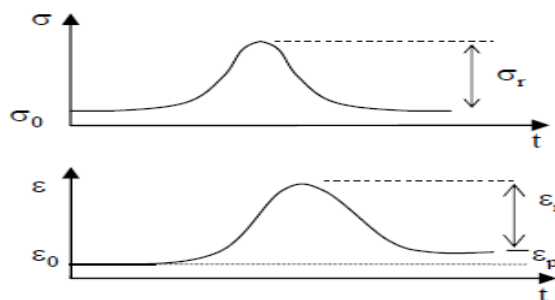


Fig.6 – Resposta a tensão vertical de carga rolante

A relação entre o acréscimo de tensão aplicada (σ_r) devido à carga rolante, e a extensão elástica recuperável (ϵ_r) traduz a capacidade de degradação de cargas da mistura betuminosa e designa-se por módulo de deformabilidade (E_m), que de forma simplificada, é considerado como módulo de elasticidade.

$$E_m = \frac{\sigma_r}{\epsilon_r} \quad (4)$$

A avaliação das características de deformabilidade é habitualmente feita recorrendo a ensaios com aplicação de cargas repetidas a temperatura constante, nos quais se aplica a um provete geralmente prismático uma tensão variável ciclicamente ao longo do tempo, com determinada frequência angular de carregamento ($\omega = 2 \pi f^1$) e que se rege pela expressão:

$$\sigma(t) = \sigma_r \times \text{sen}(\omega \times t) \quad (5)$$

Como se observou (figura 6), existe um desfasamento entre a carga e a resposta do material. Nos ensaios com aplicação de cargas repetidas, o desfasamento entre as ondas de tensão e de extensão designa-se ângulo de fase (ϕ). É importante conhecer o valor desta grandeza, que constitui desta forma um indicador do comportamento elástico ou viscoso do material. Num material puramente elástico a resposta é imediata e não existe qualquer desfasamento entre as ondas de tensão e de extensão, sendo nesse caso ϕ nulo. No limite, um material puramente viscoso apresenta ϕ igual a 90° . As condições usadas para a realização dos ensaios de cargas repetidas são válidas no domínio das pequenas deformações. Se isto se verificar, o material apresenta sempre um comportamento próximo do linear, e pode-se definir um módulo complexo dado pela expressão:

$$E^* = \frac{\sigma_r}{\epsilon_r} \times e^{i\phi} \quad (6)$$

Analisando o quociente entre a tensão aplicada e a extensão produzida, pode-se definir o módulo complexo da mistura betuminosa desta forma:

$$E^* = E_1 + i \times E_2 = |E^*| \times [\cos(\phi) + i \times \text{sen}(\phi)] \quad (7)$$

O módulo tem assim duas componentes: a parte real (ou elástica), E_1 , e a parte imaginária (ou viscosa), E_2 . A primeira representa a energia armazenada no material, que pode ser recuperada, e a

¹ Frequência de carregamento.

segunda representa a energia perdida por atrito interno no seio do material. Os valores das componentes do módulo complexo dependem do seu valor absoluto e do ângulo de fase:

$$E_1 = |E^*| \times \cos(\phi) \quad (8)$$

$$E_2 = |E^*| \times \text{sen}(\phi) \quad (9)$$

Conhecidas as componentes do módulo complexo, E_1 e E_2 , pode determinar-se o valor absoluto do módulo complexo, ou **módulo de deformabilidade**, e o **ângulo de fase**.

$$|E^*| = E_m = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2} \quad (10)$$

$$\phi = \arctg\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (11)$$

No que respeita ao coeficiente de Poisson (ν), para as misturas betuminosas, varia entre 0,3 e 0,5 conforme a frequência e a temperatura do ensaio. Apesar de ser necessário conhecer este valor, deve-se referir que tem uma importância muito reduzida na análise estrutural do pavimento, quando comparado com o conhecimento do módulo de deformabilidade.

5

CRITÉRIOS DE RUÍNA

5.1. INTRODUÇÃO

Tal como foi enunciado, as estruturas dos pavimentos rodoviários são submetidas, ao longo da sua vida útil, a acções extremamente variáveis que afectam as propriedades mecânicas das camadas betuminosas (principalmente o módulo de deformabilidade). Como efeito do referido, resulta em cada ponto um estado de tensão e de deformação, gerando mecanismos de degradação das camadas betuminosas, ou seja, progressivas alterações e conseqüente redução da qualidade dos materiais constituintes do pavimento. Os principais esforços habitualmente considerados no dimensionamento de um pavimento flexível são os que determinam as **extensões horizontais de tracção na parte inferior das camadas betuminosas** (onde se instalam as maiores extensões de tracção que determinam a rotura por fadiga dessa camada) e as **extensões verticais de compressão no topo do solo de fundação** (responsável pela ocorrência de deformações permanentes à superfície do pavimento).

5.2. FADIGA

O fendilhamento por fadiga, tende a ocorrer tanto mais rapidamente quanto mais elevados forem os esforços de tracção instalados. As leis de comportamento à fadiga, regra geral, relacionam a extensão máxima de tracção induzida com o correspondente número de aplicações de carga que conduz à ruína do material por este critério de rotura.

A fadiga, ocorre sobretudo a temperaturas baixas a moderadas, quando as camadas betuminosas apresentam um comportamento visco-elástico com forte componente elástica. Manifesta-se pelo aparecimento de fendas na zona de passagem dos rodados dos veículos e propagam-se desde a parte inferior das camadas betuminosas até à superfície. Estas fendas que aparecem à superfície do pavimento evoluem de fendas longitudinais isoladas para fendas ramificadas, até ao aparecimento constituído pela “pele de crocodilo”.



Fig.7 – Fendilhamento tipo “pele de crocodilo” num pavimento

Relativamente aos ensaios que podem ser usados para a avaliação da resistência das misturas ao fendilhamento por fadiga, destacam-se:

- Flexão simples: sujeitando vigas apoiadas a cargas pulsatórias ou sinusoidais, com carregamento central em um ou dois pontos; ou submetendo vigas em consola, de forma trapezoidal ou cilíndrica, a carregamento sinusoidal na sua extremidade;
- Flexão com apoio, sujeitando lajes ou vigas colocadas sobre apoios flexíveis em todo o seu comprimento a cargas repetidas (para simular um estado de tensão mais representativo do que ocorre in situ);
- Tracção simples, com aplicação de cargas pulsatórias ou sinusoidais a provetes cilíndricos, na direcção perpendicular às bases do provete;
- Compressão diametral (tracção indirecta), com aplicação de cargas pulsatórias de compressão a provetes cilíndricos, numa direcção diametral;
- Ensaios de fractura, sobre provetes com uma fenda induzida;
- Ensaios de torção em consola com cargas pulsatórias ou sinusoidais;
- Ensaios à escala real, em troços experimentais de pavimentos reais sujeitos a tráfego controlado.

5.3. DEFORMAÇÃO PERMANENTE

Quanto às deformações permanentes de misturas betuminosas, pode ter origem no topo do solo de fundação (como se disse, é a situação considerada para análise do estado de tensão/extensão no dimensionamento de pavimentos) ou então à superfície de pavimentos flexíveis sujeitos a tráfego muito intenso, mais concretamente nos locais de passagens dos rodados de veículos pesados, surgindo depressões longitudinais (cavados de rodadeiras tal como se pode detectar na figura 8) eventualmente acompanhadas por elevações laterais. Quando colocada num pavimento, e durante os primeiros anos de serviço, uma mistura betuminosa está sujeita a um processo de redução da sua porosidade (pós-compactação) até esta atingir valores iguais ou inferiores a 3%. Este fenómeno, que ocorre devido à solitação do tráfego pesado, origina as referidas deformações na zona que limita a área de contacto entre o pneu e o pavimento.

Tal como no caso da fadiga, também o comportamento da estrutura quanto às deformações permanentes, é avaliado mediante leis de comportamento (tema que será abordado mais à frente, no capítulo referente ao dimensionamento).

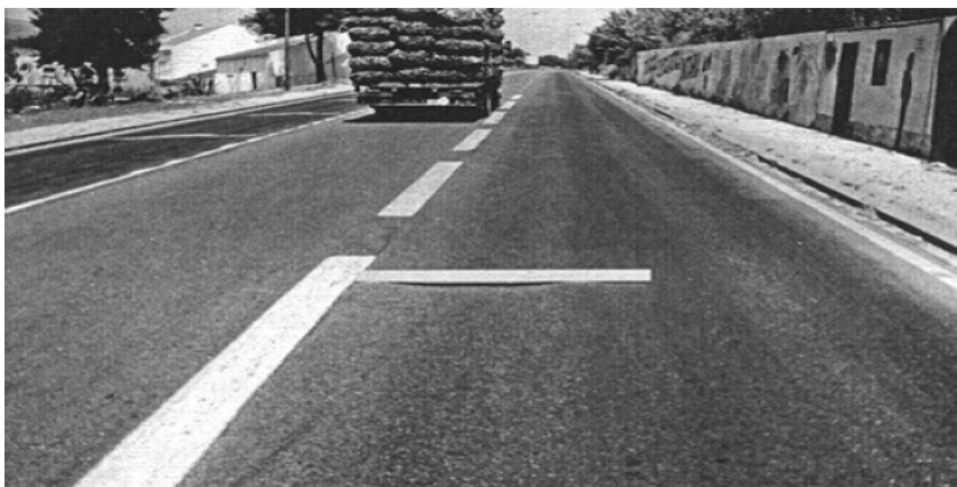


Fig.8 – Deformações permanentes tipo rodeira num pavimento

Dos ensaios que podem ser utilizados para caracterizar a resistência das misturas às deformações permanentes, evidenciam-se os seguintes:

- Ensaio de compressão simples, com aplicação de cargas estáticas ou repetidas;
- Ensaio de compressão triaxial, com aplicação de cargas estáticas ou repetidas;
- Ensaio de corte, com aplicação de cargas estáticas ou repetidas;
- Ensaio à escala real, em troços experimentais de pavimentos reais sujeitos a tráfego controlado.

5.4. RUÍNA EM PAVIMENTOS RÍGIDOS E SEMI-RÍGIDOS

Analisando agora os pavimentos rígidos, pode dizer-se que os pontos mais críticos, ou seja, mais sujeitos à rotura, situam-se na parte inferior das camadas aglutinadas com cimento, devido à fadiga por repetição de extensões de tracção. As resultantes tensões geradas podem ver o seu efeito negativo ser atenuado com a colocação de juntas devidamente espaçadas, a intervalos de poucos metros, que dividem as lajes em painéis, sendo os esforços de tracção reduzidos. Estas juntas permitem, nos pavimentos em serviço, os movimentos de dilatação e retracção das lajes provocadas pelas variações da sua temperatura. Devido à sua importância no funcionamento dos pavimentos em que existem e a serem elementos delicados, refira-se, que exigem cuidados especiais de realização e de conservação.

No caso de pavimentos de betão armado contínuo, o problema é resolvido com a armadura, que absorve as referidas tensões.

Neste tipo de pavimento (rígidos) pode mesmo ocorrer rotura estrutural, ou seja, toda a espessura da camada fendilhar, ao contrário do que sucede nos pavimentos flexíveis, pois estes deformam-se mas não chegam a romper estruturalmente.

Quanto aos pavimentos semi-rígidos, também pode dizer-se que os pontos mais críticos estão situados geralmente na parte inferior das camadas aglutinadas com cimento.

6

MISTURAS BETUMINOSAS

6.1. INTRODUÇÃO

Conforme se mencionou na introdução, em Portugal os pavimentos que mais se aplicam são os flexíveis, cuja estrutura é composta e fundamentalmente condicionada por misturas betuminosas. Como resultado disso mesmo, naturalmente importa aprofundar o seu estudo.

Estas são constituídas essencialmente por um conjunto de materiais granulares doseados de uma forma ponderal ou volumétrica e misturados em central com uma quantidade de ligante previamente determinada. Logicamente, como o comportamento das misturas betuminosas depende de cada um dos componentes elementares que as compõem, antes de se proceder ao estudo da sua formulação, é imperativo que os agregados e o ligante betuminoso sejam correctamente estudados e caracterizados, de modo a que o desempenho das misturas não seja comprometido pelo comportamento inadequado dos seus constituintes.

6.2. LIGANTE

O ligante betuminoso, ocupa 10 a 15% do volume da mistura betuminosa e pode ser de um dos principais tipos de ligantes:

- Betumes puros;
- Emulsões betuminosas;
- Betumes modificados.

Tanto os betumes puros como as emulsões betuminosas podem ser modificados pela adição de determinados agentes que melhoram certas características do betume, sendo fundamentais para um adequado desempenho da mistura betuminosa em serviço. Obtêm-se assim betumes modificados. Podem ser modificados por aditivos (aditivos de adesividade, componentes organo-metálicos, enxofre...), por polímeros (plastómeros, elatómeros naturais ou sintéticos, borrachas recuperadas e fibras orgânicas, resinas e endurecedores) ou através de reacções químicas. Em Portugal, o betume modificado mais usado é aquele em que o aditivo é um elastómero. No entanto, os betumes puros, designadamente os betumes asfálticos são hoje em dia praticamente os únicos a serem usados em trabalhos de pavimentação rodoviária. Desta forma, é essencial a sua caracterização e a definição de dois conceitos distintos: composição química e estrutura.

Os betumes puros são obtidos por destilação directa do petróleo bruto, formando uma mistura química muito complexa de moléculas de natureza predominantemente hidrocarbonatada com menores

quantidades de grupos contendo átomos de enxofre, nitrogénio e oxigénio. Resultante da análise a uma vasta gama de petróleos, é tido que os betumes, quanto a sua **composição química** contêm:

- Carbono: 82 a 88 %;
- Hidrogénio: 8 a 11%;
- Enxofre: 0 a 6 %;
- Oxigénio: 0 a 1,5 %;
- Nitrogénio: 0 a 1 %.

No entanto como esta análise é muito complexa, para que se permita atingir uma melhor percepção quanto ao funcionamento do betume, alternativamente è usual dividi-lo em dois grandes grupos bastantes distintos: os asfaltenos e os maltenos. Por sua vez estes últimos, podem ser subdivididos em saturados, aromáticos e resinas. Será de seguida feita uma descrição dos elementos referidos:

- Os asfaltenos, cuja estrutura tipo pode ser observada na figura 9, são sólidos amorfos, castanhos ou pretos, contendo carbono e hidrogénio em adição com nitrogénio, enxofre ou oxigénio, e constituem 5 a 25% do betume. São considerados materiais aromáticos altamente polares e complexos, com peso molecular elevado. O teor em asfaltenos tem uma grande influência nas características reológicas do betume, uma vez que o seu aumento conduz a um betume mais duro e com menor penetração, com um ponto de amolecimento mais elevado e com maior viscosidade;
- As resinas contêm carbono e hidrogénio em adição a pequenas quantidades de nitrogénio, enxofre ou oxigénio. São sólidas ou semi-sólidas, castanhas escuras e muito polares, o que as torna excessivamente adesivas (é a fracção que inicialmente adere aos agregados). São agentes dispersivos ou peptizantes para os asfaltenos e a proporção entre as duas fracções define o carácter do betume (tipo solução ou tipo gelatinoso);
- Os aromáticos, cuja estrutura tipo também se pode observar na figura 9, têm o menor peso molecular dentro do betume e representam a maior proporção do meio dispersivo dos asfaltenos peptizados. Constituem 40 a 65% do betume e são líquidos viscosos castanhos-escuros. Consistem em cadeias de carbono não polares dominadas por sistemas de anéis não saturados e têm uma grande capacidade de dissolver outras moléculas hidrocarbonadas de elevado peso molecular;
- Os saturados compreendem cadeias hidrocarbonadas ou hidrocarbonatadas lineares e/ou ramificadas (ver figura 9). São óleos viscosos não polares de cor clara, cujo peso molecular médio é semelhante ao dos aromáticos. Esta fracção corresponde a um valor entre 5 e 20% do betume.

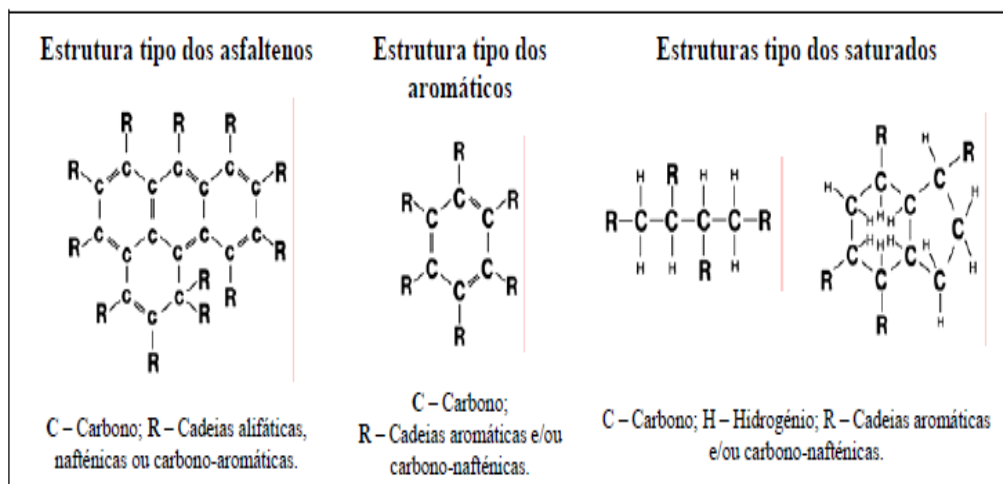


Fig.9 – Estrutura tipo das frações de asfaltenos, aromáticos e saturados dum betume

Estruturalmente, o betume é tradicionalmente considerado como um sistema coloidal, consistindo numa dispersão de micelas de elevado peso molecular (asfaltenos) num meio dispersante, oleoso, de menor peso molecular (maltenos). Os maltenos constituem assim, o meio contínuo das micelas de asfaltenos. Na presença de quantidades suficientes de resinas e aromáticos de poder dispersivo adequado, os asfaltenos são totalmente peptizados e as micelas resultantes têm uma boa mobilidade dentro do betume. Nesta situação, este apresenta-se com uma estrutura tipo SOL (partículas sólidas dispersas num líquido).

Se as frações de resinas e aromáticos não forem ou se tiverem um fraco poder dispersivo, os asfaltenos podem associar-se e juntar-se cada vez mais. Isto pode originar uma estrutura irregular aberta tipo blocos vazados de micelas ligadas, nas quais os vazios internos são preenchidos com o anterior meio dispersivo. Nesta situação o betume tem uma estrutura tipo gelatinosa, GEL (partículas líquidas dispersas num sólido).

No que respeita à reologia dos betumes, observa-se que o aumento do teor em aromáticos origina uma redução marginal na susceptibilidade do betume ao corte, e o aumento em saturados amolece o betume. Já, o aumento do teor em resinas ou asfaltenos (estes têm um papel muito importante na reologia do betume) endurece o betume, que por um lado conduz à redução do índice de penetração e da susceptibilidade ao corte e por outro leva ao aumento da viscosidade e da adesividade.

O efeito da temperatura na variação da viscosidade do betume é assim facilmente compreendido: o aumento da temperatura origina a destruição das ligações de hidrogénio dos asfaltenos, quebrando as estruturas dos mesmos e reduzindo a quantidade de entidades esféricas não dissolvidas, reduzindo assim a viscosidade; quando a temperatura diminui, as estruturas dos asfaltenos voltam a unir-se originando um aumento da viscosidade do betume.

A caracterização dos betumes puros é feita através de um conjunto de ensaios que medem o seu comportamento a diversas temperaturas. Os ensaios tradicionalmente utilizados são apresentados a seguir, sendo que as duas propriedades mais importantes para a caracterização de um betume, são a penetração e o ponto de amolecimento:

- Penetração do betume a 25°C, durante 5 segundos (pen25);
- Ponto de amolecimento “anel e bola” (TAB);
- Ponto de fragilidade de Fraass;

- Viscosidade cinemática a 60 °C e a 135 °C;
- Ponto de inflamação no Cleveland Open Cup;
- Perda de massa por aquecimento a 163°C;
- Ductilidade a 25°C;
- Recuperação elástica;
- Solubilidade no tricloroetileno (pureza do betume).

O betume é classificado, normalmente, através do valor obtido no ensaio de penetração, que avalia indirectamente a viscosidade ou dureza do betume a determinada temperatura. Os valores da penetração do betume puro, obtidos no ensaio de penetração, variam entre 10/20 (betumes muito duros) até 180/220 (betumes muito fluidos). Em Portugal, os betumes geralmente mais usados são o 35/50, o 50/70 e o 160/220, em função das condições climáticas e do tipo de trabalho a realizar. Actualmente no nosso país, usam-se muito os betumes 50/70 para o fabrico de misturas betuminosas realizadas a quente, destinadas às camadas superiores dos pavimentos. O betume 35/50 está também a ser usado nas regiões temperadas e nas mais quentes do país para as camadas de base e também de desgaste. O ensaio, consiste em medir-se a profundidade de penetração dum agulha com 100 gramas numa amostra de betume à temperatura de 25°C, durante 5 segundos.

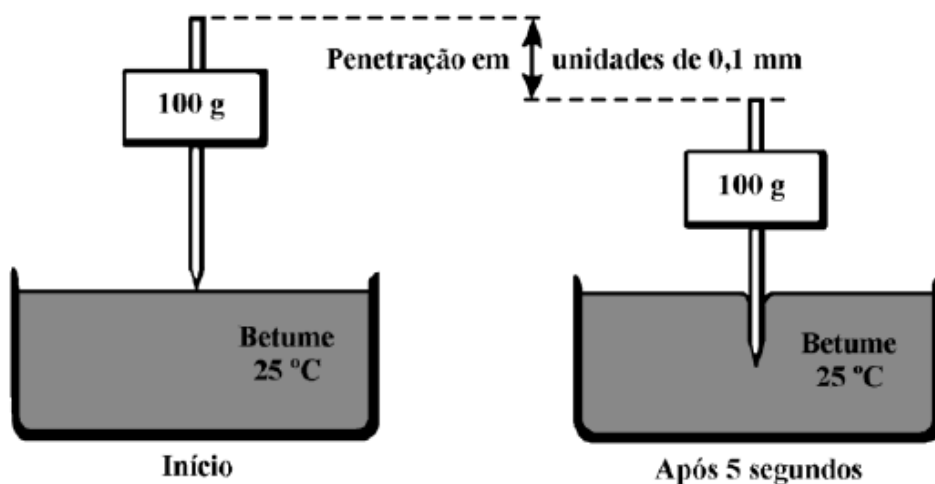


Fig.10 – Esquema representativo do ensaio de penetração (Branco)

O ensaio para determinação do ponto de amolecimento pelo método do anel e bola permite classificar o comportamento do betume a temperaturas elevadas. Neste ensaio, determina-se a temperatura de amolecimento à qual um provete de betume, quando submetido a um aquecimento progressivo e ao peso de uma esfera de aço, atinge uma consistência que conduz ao seu escoamento através de um anel metálico até atingir determinada deformação.

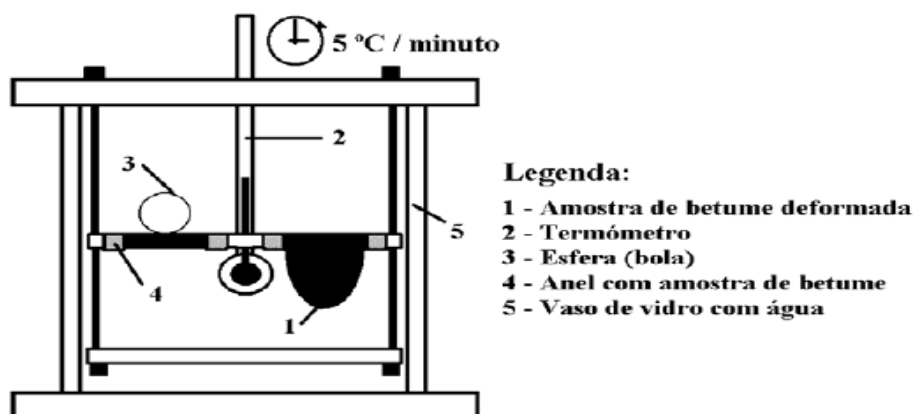


Fig.11 – Ensaio para determinação do ponto de amolecimento pelo método anel e bola (Branco)

O comportamento frágil do betume a baixas temperaturas é avaliado através do ensaio de determinação do ponto de Fraass (temperatura de fragilidade). Este ensaio consiste em determinar, a temperatura mínima, à qual um filme de betume se rompe, sob a acção de flexões repetidas.

O ensaio para a determinação cinemática do betume a 60°C (temperatura de serviço máxima) e a 135 °C (temperatura média de produção e espalhamento da mistura betuminosa) utiliza um conjunto de tubos viscosímetros capilares, nos quais é colocado betume até determinada posição, e em seguida são introduzidos dentro de um líquido que mantém o betume à temperatura de ensaio (60 ou 135 °C). O betume fluirá então dos capilares do tubo até uma segunda posição. A viscosidade cinemática é calculada com base no tempo que o betume demora a percorrer a distância entre as duas posições, multiplicando por um factor correctivo (factor esse que depende do equipamento utilizado). A viscosidade cinemática do betume exprime-se em m²/s, ou frequentemente em mm²/s e relaciona-se com a viscosidade dinâmica (expressa em Pa.s) através da seguinte expressão:

$$\text{Viscosidade cinemática} = \frac{\text{Viscosidade dinâmica}}{\text{Massa Específica}} \quad (12)$$

O conhecimento da viscosidade permite quantificar a consistência do ligante a diversas temperaturas e avaliar o intervalo de temperaturas em que é possível, por exemplo, manipular o ligante em boas condições de mistura.

A medição do ponto de inflamação do betume é importante para garantir a segurança no manuseamento do betume durante o processo de produção da mistura betuminosa a elevadas temperaturas. O ponto de inflamação indica a temperatura à qual o betume se inflama automaticamente na presença de uma chama. O ponto de inflamação é medido normalmente, num equipamento de ensaio denominado Cleveland Open Cup. Neste ensaio, um recipiente é preenchido com um determinado volume de betume aquecido progressivamente e, em intervalos de tempo definidos, passa-se uma pequena chama sobre o betume. A temperatura à qual os vapores do betume provocam uma chama é o ponto de inflamação.

O comportamento elástico do betume pode ser medido recorrendo ao ensaio de ductilidade, que consiste em determinar o alongamento à rotura de três provetes normalizados de betume, traccionados à temperatura de 25 °C e à velocidade de 5 cm/min.

O ensaio de recuperação elástica é realizado no mesmo equipamento em que se determina a ductilidade do betume. O provete de betume é alongado até 20 cm de comprimento, posição em que permanece durante 5 minutos. De seguida, corta-se o provete a meio e deixa-se que o betume recupere parte da sua deformação durante uma hora. No final, unem-se as duas metades do provete e mede-se o comprimento total do provete. A percentagem do comprimento recuperado em relação ao comprimento alongado é a recuperação elástica.

O ensaio de medição da solubilidade no tricloroetileno serve para determinar a pureza do betume. Uma pequena amostra de betume é dissolvida em tricloroetileno e em seguida filtrada num filtro de fibra de vidro. Os materiais no filtro são as impurezas.

Assim, os resultados obtidos nos ensaios de penetração, temperatura de amolecimento, ponto de Fraass e viscosidade cinemática, permitem traçar o diagrama BTCD (Bitumen Test Data Chart), exposto na figura 12, indicando o comportamento do betume a diversas temperaturas.

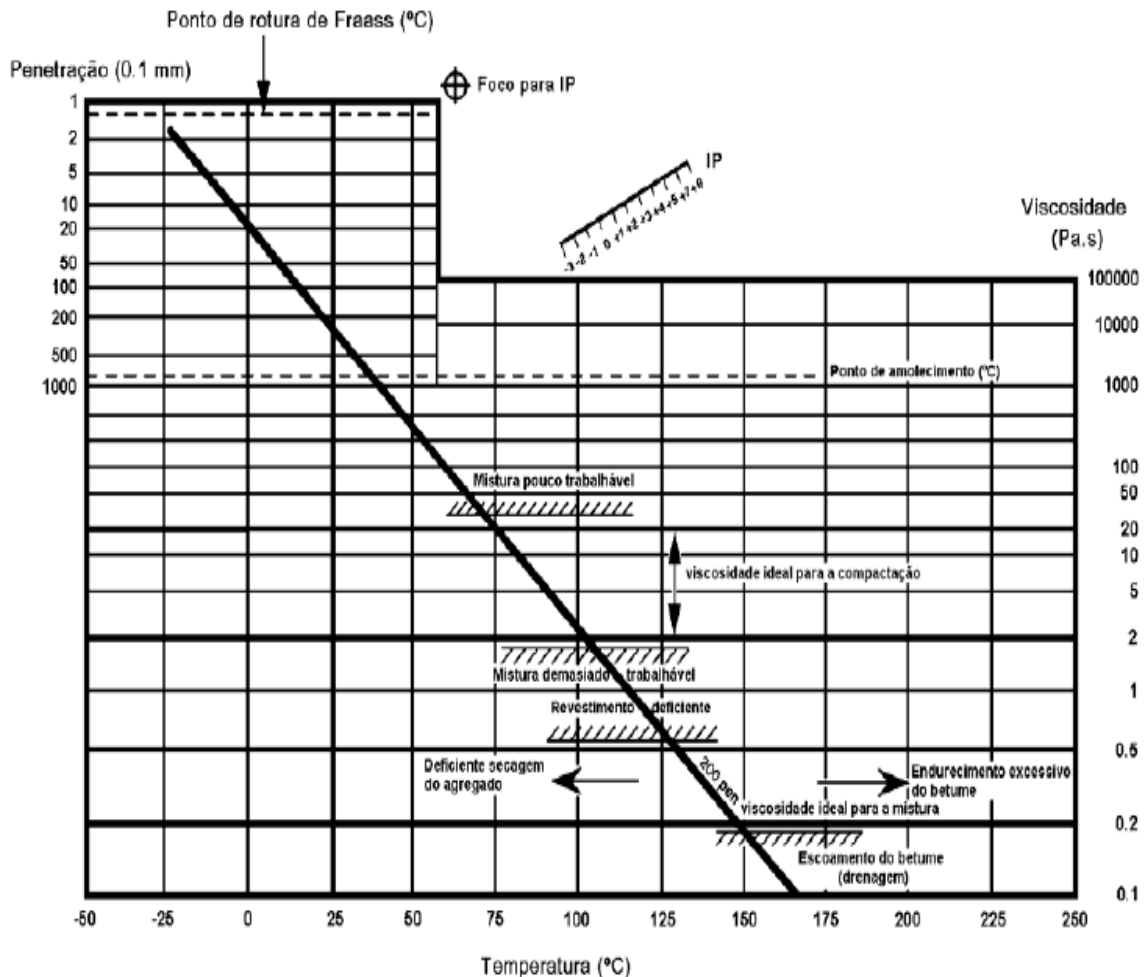


Fig.12 – Diagrama BTCD: viscosidades “ideais” para a mistura e compactação de misturas betuminosas

Com base neste diagrama, podem determinar-se as temperaturas da mistura e de compactação ideais (correspondentes às viscosidades indicadas na figura acabada de representar) e a susceptibilidade térmica do betume. Quanto maior for a inclinação da recta de comportamento do betume, maior será a susceptibilidade térmica do betume, o que implica um mau comportamento deste em locais com grandes variações térmicas.

Posteriormente, para avaliar o comportamento do betume em várias condições de serviço, podem ser realizados os três ensaios a seguir descritos, que constam do programa SHRP:

- O ensaio de flexão estática, que mede as características do ligante betuminoso a baixas temperaturas, quando este se comporta como um sólido visco-elástico. Ensaia-se vigas de betume à flexão em três pontos, e mede-se a curvatura central sofrida pela viga. A representação das variações de carga e da curvatura central em função do tempo permite calcular o módulo de fluência e a sua variação ao longo do tempo;
- O ensaio com reómetro dinâmico de corte, mede o módulo de corte complexo do betume e o ângulo de fase, através duma acção de corte repetida sobre um provete de betume prensado entre dois pratos paralelos que oscilam. Estas propriedades permitem conhecer o comportamento do betume para temperaturas médias e elevadas;
- O ensaio com viscosímetro rotacional, mede a torção necessária para manter constante a velocidade de rotação de um cilindro dentro do betume, medindo assim a sua viscosidade.

6.3. AGREGADOS

Os agregados constituem 75% a 85% do volume da mistura betuminosa. Estes devem ser analisados relativamente à sua origem geológica e à sua composição química. Podem ser originários de rochas sedimentares (calcárias ou siliciosas), ígneas ou metamórficas. Os agregados podem ter origem natural (por exemplo, areias de rios), podem ser processados (por exemplo, britados) ou podem ser sintéticos ou artificiais (por exemplo, obtidos da demolição de edifícios).

Os agregados devem ser caracterizados geométrica, física e mecanicamente. Assim, devem ser efectuados ensaios para avaliar as suas propriedades, de modo a caracterizar o seu comportamento durante os processos de fabrico e compactação das misturas betuminosas, e mais tarde em serviço no pavimento.

Os ensaios tradicionalmente usados para a caracterização dos agregados são:

- Análise granulométrica;
- Determinação da resistência ao esmagamento;
- Determinação da resistência ao choque e abrasão na máquina de Los Angeles;
- Determinação do coeficiente de polimento acelerado usando o pêndulo britânico;
- Determinação da absorção de água;
- Determinação da baridade específica;
- Determinação do equivalente de areia;
- Determinação do azul-de-metileno;
- Determinação da baridade aparente.

A granulometria dos agregados, estudada no processo de formulação das misturas betuminosas, é uma das principais características responsáveis pelo seu comportamento. A determinação da granulometria dos agregados é realizada através da peneiração dos mesmos e da pesagem da fracção retida em cada peneiro. A granulometria pode ser imposta entre determinados limites (fuso granulométrico) para cada

mistura betuminosa, ou pode consistir numa indicação específica que será posteriormente ajustada durante a fase de formulação.

No que diz respeito à resistência ao esmagamento, o comportamento dos agregados é observado, medindo a quantidade de material friável, ou seja, que se desagrega.

A resistência ao choque e abrasão é medida com o ensaio de Los Angeles.

Relativamente à avaliação do desgaste, ou polimento dos agregados (perda de rugosidade superficial), produzido pela acção dos pneumáticos dos veículos, é utilizado actualmente o ensaio de polimento acelerado. Com o pêndulo britânico mede-se a alteração do valor do atrito dos agregados, antes, durante e depois do ensaio, o que permite determinar a perda de rugosidade superficial dos agregados, avaliada através do coeficiente de polimento acelerado (CPA).

O ensaio de absorção de água mede a quantidade de água absorvida pelos agregados, o que indica a porosidade e, em parte, a quantidade de betume que estes absorvem. Os agregados utilizados na mistura betuminosa não devem ser muito porosos, porque nesse caso a quantidade total de betume necessário para produzir a mistura será muito elevada, nem totalmente impermeáveis, porque a adesividade do betume aos agregados será reduzida. Quando a porosidade dos agregados é elevada, tem de se adicionar uma quantidade extra de betume, para que a mistura betuminosa não fique pouco trabalhável ou com problemas de falta de coesão entre os componentes da mistura.

Os agregados devem apresentar-se limpos, não possuindo impurezas como argila e matéria orgânica. Estas substâncias podem reduzir o atrito entre os grãos, havendo a possibilidade de ocorrerem variações volumétricas com a água ou, ainda, de haver uma maior dificuldade no envolvimento dos agregados pelos ligantes. Para medir o grau de limpeza dos agregados, podem ser realizados os ensaios do equivalente em areia, para determinar a quantidade de material muito fino, ou do azul-de-metileno, para conhecer quais as quantidades de material fino e de argila, presentes nos agregados. Quando a percentagem de material fino e argila presente nos agregados ultrapassar os valores especificados, estes devem ser rejeitados.

As baridades específica e aparente dos agregados também devem ser determinadas para obter os parâmetros volumétricos das misturas betuminosas. A baridade dos agregados não deve ser muito baixa, uma vez que resulta numa resistência reduzida das misturas.

6.4. FUNÇÕES DOS COMPONENTES

O estudo das características dos componentes e da composição volumétrica das misturas betuminosas é fundamental para que estas tenham um desempenho adequado em serviço. As figuras seguintes, elucidam o modo como se distribuem em termos proporcionais, os materiais que as compõem:

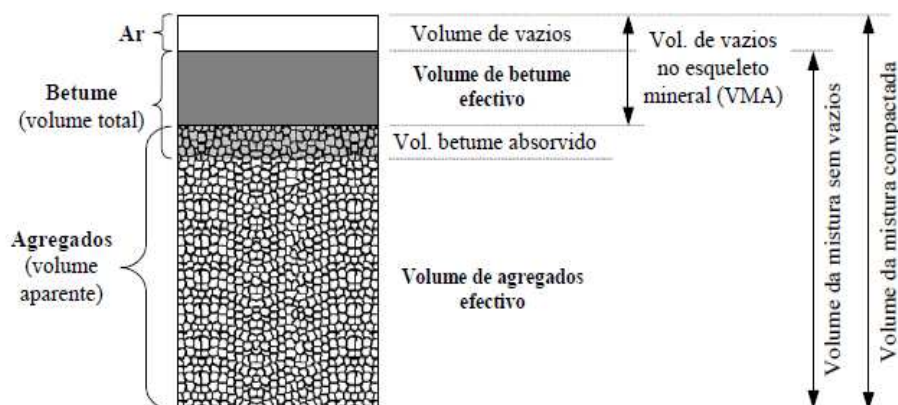


Fig.13 – Composição volumétrica duma mistura betuminosa

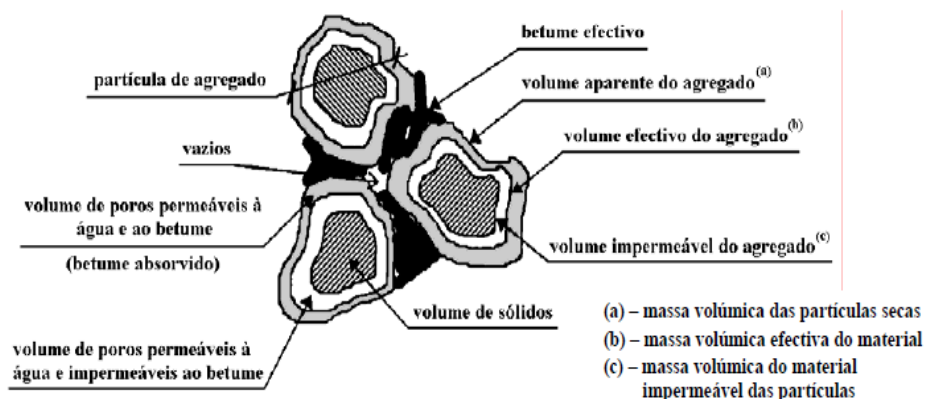


Fig.14 – Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa

Cada um destes componentes desempenham determinadas funções, que obviamente vão influenciar o comportamento das misturas que integram.

Começando pelos agregados, pode dizer-se que exercem diferentes funções, dependendo das suas dimensões (agregados grossos, finos e filer). Os agregados grossos desempenham as seguintes funções: garantir estabilidade à mistura, ou seja, resistência às deformações permanentes; aumentar a resistência mecânica das mesmas (aumento do módulo de deformabilidade); assegurar rugosidade superficial suficiente para a circulação dos veículos (capacidade da mistura garantir aderência pneu-pavimento); etc...

Os agregados finos, de dimensões inferiores a 2,00 mm permitem que as misturas betuminosas obtenham estabilidade e compactidade. Acrescente-se que esta última propriedade está relacionada com o arranjo estrutural dos agregados, sendo controlada pelo valor do volume de vazios no esqueleto mineral (VMA). O VMA corresponde a todo o volume de vazios da mistura compactada que resultaria retirando-se todo o betume sem que se alterasse a posição dos agregados, ou de uma forma mais esclarecedora pode dizer-se que é o espaço vazio intergranular, entre as partículas dos agregados de uma mistura compactada, incluindo o volume de vazios e o volume de betume efectivo (ver figura 14).

O filer comercial² assegura a fracção granulométrica mais fina. É assim determinante para a qualidade do mastic da mistura betuminosa (filer mais betume) e responsável pela compactidade e impermeabilidade da mesma. Deve ser constituído por pó de calcário ou cimento portland, e apresentar-se aquando do fabrico da mistura, seco e isento de torrões e de substâncias prejudiciais. Como a utilização de diferentes tipos de filer em misturas betuminosas aparentemente iguais origina frequentemente um comportamento muito diferente das mesmas no pavimento, é relevante ter cuidado na análise das características físicas e químicas deste componente.

Quanto ao ligante betuminoso, este desempenha as funções de aglutinante e impermeabilizante. Como aglutinante, proporciona uma íntima ligação entre os agregados, sendo assim capaz de resistir à acção mecânica da desagregação produzida pelas cargas dos veículos. Como impermeabilizante, garante ao pavimento uma vedação eficaz contra a penetração da água proveniente tanto da precipitação quanto do leito do pavimento por acção capilar. Além disso, assegura ao pavimento flexibilidade, permitindo a sua acomodação sem a ocorrência de fissuras, e confere trabalhidade à mistura betuminosa, funcionando como lubrificante das partículas granulares. Deste modo, é possível conferir durabilidade à mistura, assim como condições adequadas de produção em central e compactação in situ.

Os vazios desempenham igualmente um papel importante. De facto, quando as misturas referidas apresentam um volume de vazios elevado, são mais permeáveis, menos duráveis e têm uma menor resistência às deformações permanentes. Quando o volume de vazios é demasiadamente baixo (inferior a 3%), surgem problemas de estabilidade da mistura betuminosa, havendo uma forte aptidão para a ocorrência de deformações permanentes e para a exsudação do ligante.

6.5. PROPRIEDADES FUNDAMENTAIS

Independentemente do tipo de camada a utilizar, devem ser garantidos determinados critérios de economia, durabilidade e facilidade de execução. São essencialmente, exigidas às misturas betuminosas as seguintes características: flexibilidade, estabilidade, durabilidade, resistência à fadiga, resistência à derrapagem, impermeabilidade e trabalhidade, como se pode analisar no seguinte quadro:

² O termo “filer” corresponde à fracção granulométrica de material passado no peneiro 200 (0,075mm).

Quadro 3 – Variáveis que afectam as misturas betuminosas

Propriedades	Definição	Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas
<i>Flexibilidade</i>	Aptidão da mistura em se adaptar às deformações das camadas subjacentes	- granulometria - teor em betume - rigidez do betume
<i>Estabilidade</i>	Resistência às deformações permanentes (usualmente a altas temperaturas e longos tempos de carga) – condições para baixos Emist	- textura da superfície do agregado - granulometria - teor em betume
<i>Durabilidade</i>	Resistência às acções climáticas (ar e água) e à acção abrasiva do tráfego	- granulometria - teor em betume - grau de compactação - sensibilidade à água
<i>Resistência à fadiga</i>	Aptidão da mistura em resistir a esforços de flexão repetidos sem fendilhar	- granulometria - teor em betume - rigidez do betume - grau de compactação
<i>Resistência à Derrapagem</i>	Aptidão da mistura para proporcionar um adequado coeficiente de atrito entre o pneu e o pavimento molhado	- tipo e textura do agregado - resistência do agregado ao polimento - granulometria
<i>Impermeabilidade</i>	Aptidão da mistura em impedir o acesso da água às camadas inferiores	- granulometria - teor em betume - grau de compactação
<i>Trabalhabilidade</i>	Facilidade para realizar as operações de fabrico, colocação e compactação	- granulometria - teor em betume - tipo de betume e de agregado

A granulometria influencia todas as características de comportamento da mistura betuminosa, verificando-se que na prática, uma mistura adequada de elementos finos, médios e grossos, com uma densidade elevada, é aquela que permite obter melhores características.

Em geral, pode dizer-se que um aumento do teor em betume aumenta a resistência ao fendilhamento, a trabalhadade, a impermeabilidade e a durabilidade, mas em contrapartida, diminui a resistência às deformações permanentes e a aderência pneu-pavimento. Uma dosagem correcta de material betuminoso, está intimamente ligada a um bom desempenho e vida da estrutura, por isso é de primordial importância, que para cada camada do pavimento e em cada situação específica, se seleccione o tipo de mistura mais adequado a utilizar. Complementarmente, de seguida são apresentadas algumas deficiências que podem ser causadas pela incorrecta dosagem de betume na mistura:

- Baixa estabilidade: a principal causa é o excesso de betume na mistura;
- Oxidação acelerada: a principal causa é a falta de ligante na mistura, o que causa uma existência maior de vazios na camada, deixando os agregados mais expostos a humidade e ao ar;
- Baixa resistência à fadiga: tem como principais causas um baixo teor de betume, excesso de vazios na mistura, baixa compactação e, conseqüentemente uma espessura inadequada da camada betuminosa;
- Permeabilidade excessiva: é provocada pelo baixo teor de betume, o que causa uma quantidade maior de vazios. Pode também ser causada pela compactação inadequada da camada;
- Menor resistência à derrapagem (baixo atrito pneu/pavimento), causada principalmente pelo excesso de ligante na mistura;
- Desagregações: pode ser causada pela dosagem não uniforme ou por uma subdosagem de material betuminoso;
- Exsudações: uma das suas principais causas é a superdosagem de material betuminoso.

6.6. TIPOS DE MISTURAS BETUMINOSAS

Em Portugal, de acordo com a recente norma NP EN 13108-1, as diferentes misturas betuminosas habitualmente aplicadas em camadas de base, ligação, regularização ou desgastes dos pavimentos rodoviários (que podem ser incluídas no grupo betão betuminoso) apresentam as seguintes novas designações:

Quadro 4 – Designação das misturas betuminosas

Camada	Designação anterior	Designação actual
Base	Macadame Betuminoso Fuso B	AC 32 base ligante (MB)
	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 base ligante (MB)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 20 base ligante (MBAM)
Ligação	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 bin ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 bin ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 bin ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 bin ligante (BBsb)
Regularização ^a	Macadame Betuminoso Fuso A	AC 20 reg ligante (MB)
	Mistura Betuminosa Densa	AC 20 reg ligante (MBD)
	Mistura Betuminosa de Alto Módulo	AC 16 reg ligante (MBAM)
	Betão Betuminoso Subjacente	AC 14 reg ligante (BBsb)
	Betão Betuminoso	AC 14 reg ligante (BB)
Desgaste	Betão Betuminoso	AC 14 surf ligante (BB)
	Betão Betuminoso Rugoso	AC 14 surf ligante (BBr)
	(micro)Betão Betuminoso Rugoso	AC 10 surf ligante (BBr)

^a A EN 13108-1 contempla a aplicação de misturas betuminosas na camada de regularização do pavimento, contudo não indica a designação a adoptar para esta aplicação. Recomenda-se assim a adopção da abreviatura "reg", referente à camada de regularização cujo termo em inglês é "regulating course".

EXEMPLO: Uma mistura com a designação "AC32 base ligante (MB)", produzida com um betume de gama de penetração 35/50 (EN 12591), será identificada por "AC32 base 35/50 (MB)", onde: "AC" corresponde ao termo em inglês "Asphalt Concrete" (Betão Betuminoso, na terminologia portuguesa), "32" corresponde à abertura do peneiro superior do agregado na mistura, em milímetros (mm), "base" corresponde à camada a que se destina a mistura betuminosa, "35/50" corresponde à designação do ligante betuminoso, neste caso de acordo com a EN 12591, e "MB" são as iniciais da designação utilizada até à data em Portugal para este tipo de mistura (Macadame Betuminoso).

Nota explicativa de abreviaturas:
AC – designação do produto, cujo termo em inglês é "Asphalt Concrete";
Base – referente à camada de base, cujo termo em inglês é similar "base course";
Bin – referente à camada de ligação, cujo termo em inglês é "binder course";
Reg – referente à camada de regularização, cujo termo em inglês é "regulating course";
Surf – referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é "surface course".

Como se denota, são mantidas as abreviaturas da versão inglesa da EN 13108 -1, para facilitar o entendimento comum entre os vários Estados-membros.

6.7. FORMULAÇÃO DE MISTURAS BETUMINOSAS

A composição volumétrica da mistura betuminosa deve ser estudada em pormenor, durante a fase da sua formulação, para que esta possa ter um desempenho adequado em serviço. A utilização de métodos de formulação de misturas betuminosas tem como objectivo determinar a combinação de agregados e betume numa mistura, de tal modo que se obtenha um material de pavimentação tão económico quanto possível e com as características desejadas, ou seja, uma mistura betuminosa que seja fácil de fabricar e colocar, e que suporte os efeitos das cargas e do clima ao longo do tempo que estiver em serviço.

Os métodos de formulação podem ser divididos em famílias: tipo receita, empíricos, analíticos, volumétricos, relacionados com o comportamento das misturas betuminosas e baseados no comportamento das misturas betuminosas.

▪ Métodos por "receita"

Os métodos designados "por receita" estabelecem desde o início a constituição das misturas betuminosas, mas apenas quando estas são tradicionais e há muita experiência da sua utilização. Uma receita estabelece a curva granulométrica do agregado, a classe de penetração do betume a usar e a composição final na mistura betuminosa. Além disso, fixa a espessura da camada a colocar e as características que a mistura deve apresentar durante as operações de mistura, espalhamento e compactação. Nenhuma das tarefas indicadas implica a produção de quaisquer provetes para ensaiar

em laboratório. Os países que utilizam este tipo de métodos fazem-no apenas para materiais e composições que provaram ter bom comportamento quando em serviço. Este método de formulação continua a ser indicado e aplicado, mesmos em países onde já se utilizam métodos mais rigorosos, essencialmente em estradas com tráfego pouco intenso.

No Reino Unido, por exemplo, dada a grande experiência na utilização de misturas típicas para camada de desgaste, estas são geralmente formuladas com recurso a “receitas” pré-estabelecidas.

▪ **Métodos empíricos**

Os métodos empíricos surgiram como complemento natural dos métodos “por receita”. Estes não recorriam a quaisquer tipo de ensaios mecânicos, o que tornava impossível avaliar, ainda que com recurso a ensaios simples e económicos, a qualidade das misturas in situ quando as matérias-primas se desviavam das especificações.

Estes métodos têm por objectivo a determinação da quantidade de betume a usar no fabrico das misturas de modo a controlar várias variáveis, como por exemplo a porosidade e a estabilidade da mistura, respeitando os limites estabelecidos para aquelas com base na experiência anterior. As grandezas avaliadas ao longo do processo não são medidas directas do comportamento mecânico do material formulado.

Geralmente, compactam-se provetes em laboratório usando técnicas que não reproduzem obrigatoriamente as condições de compactação usadas em obra. Os provetes são depois sujeitos a ensaios mecânicos que não permitem medir as propriedades fundamentais dos materiais. São avaliadas propriedades definidas em cada método, medidas naqueles ensaios específicos, em condições particulares estabelecidas à partida. Os métodos de Duriez usados pelo LCPC e o método de Hveem desenvolvido nos Estados Unidos, são alguns dos exemplos que podem ser incluídos na classe dos métodos empíricos. O método de Marshall, nas variantes usadas em vários países, é o de utilização mais corrente dentro desta categoria. Apesar da evolução que se verificou ao longo dos anos, o método de formulação de Marshall (que brevemente será descrito com detalhe) continua a ser o mais utilizado.

▪ **Métodos analíticos**

Os métodos analíticos consistem no cálculo da composição volumétrica das misturas betuminosas, nomeadamente a proporção de cada uma das fracções de agregados usados e os volumes de betume e de vazios. Estes métodos não incluem o fabrico de quaisquer provetes, pelo que a composição a que se chega é de origem totalmente analítica. Em geral, dispõem ainda de modelos de previsão das características mecânicas fundamentais das misturas, as quais são determinadas com base nas composições volumétricas obtidas por aplicação do procedimento analítico. Trata-se, pois, dum processo que pode ser automatizado em computador.

▪ **Métodos volumétricos**

Os métodos volumétricos são assim designados, porque a percentagem de betume e a granulometria a usar são obtidos através da análise dos volumes parcelares que compõem as misturas (vazios, betume e agregados). Aqueles volumes são medidos sobre provetes produzidos em laboratório de modo a reproduzirem, tão fielmente quanto possível, as condições de compactação usadas in situ. Os ensaios realizados não permitem medir as propriedades mecânicas dos provetes. No entanto, considera-se que as amostras fabricadas reproduzem as condições de campo e que a composição volumétrica obtida influencia o comportamento mecânico das misturas. O equipamento usado nos ensaios, por exemplo a prensa giratória de corte (PGC), permitem medir a compacidade e estimar com uma precisão suficiente a porosidade que será obtida in situ em função da espessura das camadas. Nestes métodos, a selecção da curva granulométrica e da percentagem óptima de betume a usar é feita pela verificação da maior

ou menor correspondência entre as formulações testadas e certos requisitos de compatibilidade pré-definidos, entendendo-se estes como uma medida da aptidão da mistura para ser compactada. Tal como os analíticos, os métodos volumétricos são, só por si, insuficientes, havendo necessidade de realizar ensaios adicionais para verificar as composições resultantes dos cálculos. Dado o grande número de variáveis envolvidas, não é de todo possível obter, com elevada confiança, misturas com bom comportamento mecânico recorrendo apenas aos métodos volumétricos.

Os métodos volumétricos devem ser utilizados apenas em estradas com um tráfego pouco intenso. Nesse contexto, não é necessário determinar as propriedades mecânicas das misturas betuminosas, uma vez que o cumprimento das exigências relativas às propriedades volumétricas já garante um adequado desempenho mecânico dessas misturas.

Esta família de métodos de formulação, que como exemplo pode-se referenciar o procedimento de formulação americano SHRP – Superpave nível I, está na base dos mais recentes métodos de formulação relacionados com o comportamento ou baseados no comportamento das misturas betuminosas. Justamente, os métodos de formulação mais recentes que a seguir se vão descrever, já não se baseiam na obtenção da composição à qual corresponde um máximo desempenho mecânico da mistura betuminosa (como o método de Marshall), mas pretendem antes assegurar o cumprimento de determinado nível mínimo de comportamento exigido à mistura betuminosa, que depende da função que esta desempenhará no pavimento. Procura-se assim, compreender as relações entre a formulação de misturas e os métodos de dimensionamento e entender como é que a formulação influencia as propriedades mecânicas e o desempenho mecânico-funcional dos pavimentos que resultam da sua aplicação.

▪ Métodos relacionados com o comportamento das misturas betuminosas

A formulação de misturas betuminosas relacionada com o seu comportamento visa a obtenção, através de ensaios mecânicos (ensaios que permitem determinar as propriedades que interessam aos métodos de dimensionamento, como o módulo de deformabilidade, resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência às deformações permanentes), da composição que garante determinado nível de comportamento desejado para a mistura betuminosa.

Pode apontar-se como exemplos o método proposto pela Universidade de Nottingham, o método usado em França (Delorme) e o mais recente, método Australiano (ARRB). Estes métodos consistem no fabrico de provetes de misturas betuminosas que cumprem certos critérios estabelecidos de composição volumétrica e que são posteriormente sujeitos a ensaios de modo a estimar e/ou medir as propriedades das misturas relacionadas com o comportamento mecânico do pavimento. As composições das misturas são finalmente ajustadas com base nos resultados dos testes mecânicos realizados. Os ensaios referidos procuram reproduzir em laboratório, tanto quanto possível, o estado de tensão que ocorre no campo, nomeadamente durante os trabalhos de produção e aplicação das misturas (por exemplo, a Prensa Giratória de Corte - PGC) ou ao longo da vida do pavimento (por exemplo, o ensaio com simulador de tráfego).

▪ Métodos baseados com o comportamento das misturas betuminosas

Nos métodos de formulação baseados no comportamento, a mistura betuminosa, inicialmente otimizada através dum dos métodos de formulação anteriormente citados, é avaliada através de ensaios mecânicos que devem permitir obter as propriedades fundamentais das misturas betuminosas. Os provetes usados nos mesmos, são compactados empregando procedimentos que permitem representar correctamente a compactação in situ, através por exemplo da utilização do cilindro de rastos lisos.

Tais propriedades fundamentais, são usadas como dados de entrada em modelos matemáticos que fazem parte dum sistema informático de avaliação integrado, permitindo uma interacção entre a formulação das misturas e o dimensionamento do pavimento

Assim, com base nestes modelos, nos dados de projecto (estrutura do pavimento, tráfego e clima) e nos resultados dos ensaios realizados é possível prever o comportamento das misturas betuminosas utilizadas no pavimento e estimar a evolução dos diferentes tipos de degradação ao longo do período de vida do pavimento.

Os métodos de formulação baseados no comportamento das misturas betuminosas foram desenvolvidos nos EUA, no âmbito do programa de investigação SHRP. A primeira proposta dum método de formulação baseado no comportamento das misturas betuminosas foi a indicada nos níveis 2 e 3 do método de formulação Superpave, para tráfego médio e elevado. Posteriormente, surgiu outro método de formulação baseado no comportamento das misturas betuminosas, apresentado no documento SHRP A-968.

Cada método de formulação deve ser utilizado criteriosamente em função de vários factores, tais como: normalização existente, importância da obra a realizar, experiência do responsável pela formulação ou equipamentos disponíveis para executar os ensaios. Examinando estes critérios, e tendo em conta o conjunto as vantagens e desvantagens dos vários métodos referidos é possível a escolha do tipo de formulação mais apropriado para cada caso concreto.

Quadro 5 – Vantagens e desvantagens dos vários métodos de formulação de misturas betuminosas

Métodos de formulação	Vantagens	Desvantagens
<i>Tipo "receita"</i>	<ul style="list-style-type: none"> -facilidade de aplicação -grande experiência na sua realização -baseados em "receitas" que demonstraram um bom comportamento in situ -há especificações em muitos países, adequadas às condições locais -aplicados a uma gama variada de misturas -é fácil especificar os materiais necessários para fabricar a mistura betuminosa -é mais fácil cumprir exigências do que alterar a composição, com base em ensaios mecânicos -o controlo das propriedades dos materiais e das misturas também é relativamente fácil 	<ul style="list-style-type: none"> -aplicam-se apenas em determinadas condições climáticas e para um determinado nível de tráfego -o comportamento das misturas não depende só da composição, mas de outros factores não definidos -se um requisito não for cumprido, é impossível saber a sua influência no comportamento da mistura -os requisitos podem impedir a utilização de material disponível nas proximidades do local da obra -entre várias "receitas", é complexo escolher a mais adequada para a formulação a realizar -é difícil introduzir inovações -misturas com a mesma "receita" podem ter diferentes propriedades, para materiais de diferentes origens

<p><i>Empíricos</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -baseiam-se em ensaios simples de baixo custo -não requerem profissionais qualificados -a enorme quantidade de resultados disponíveis permite um critério de qualidade das misturas betuminosas 	<ul style="list-style-type: none"> -não utilizam ensaios fundamentais que se baseiam no comportamento das misturas em serviço -ensaios realizados em condições pouco fundamentadas -não são adequados às novas condições de tráfego -a produção de provetes em laboratório não simula a compactação que ocorre no pavimento -não se utilizam em misturas para bases betuminosas -estados de tensão instalada no provete mal definidos
<p><i>Analíticos</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -estimam as propriedades das misturas betuminosas através de cálculos analíticos -determinam o teor em mástique a usar na mistura, evitando o seu excesso ou carência -reduzem os estudos preliminares que permitem definir as composições de estudo da mistura -determina-se facilmente a causa duma formulação inadequada 	<ul style="list-style-type: none"> -obrigam a cálculos laboriosos, o que impede o seu uso prático sem o suporte de programas informáticos -o recurso a estes métodos em exclusivo (não sendo realizado nenhum ensaio), não garante um bom comportamento mecânico das misturas betuminosas
<p><i>Volumétricos</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -aplicam-se com relativa facilidade, não tendo particulares exigências e custos de utilização de equipamento e de procedimento -em relação aos métodos empíricos, dá maiores garantias de que a composição final obtida na formulação terá um bom desempenho em serviço 	<ul style="list-style-type: none"> -não se medem certas propriedades das misturas relacionadas com o seu comportamento em serviço -inadequados para condições de tráfego muito intenso -apenas permitem avaliar a trabalhadade e a resistência às deformações permanentes da mistura -não se assegura um bom comportamento das misturas betuminosas apenas através deste método

<p><i>Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -permitem comparar as misturas explicitamente, no que respeita aos comportamentos exigidos -podem simular o estado de tensão e deformação existente no pavimento -boa correlação entre os resultados medidos em laboratório e posteriormente, in situ -estimulam a inovação e o uso de novos materiais 	<ul style="list-style-type: none"> -a análise crítica e a validação dos resultados estão limitadas à reduzida experiência na sua aplicação -os custos e o tempo necessários para a realização dos ensaios são elevados -ensaios realizados em poucos laboratórios -utilização num reduzido número de pavimentos
<p><i>Baseados no comportamento das misturas betuminosas</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> -não é obrigatório que as misturas respeitem os limites volumétricos de composição -estimula a inovação e o uso de novos materiais -estima o comportamento da mistura in situ e a evolução da degradação nos pavimentos ao longo do período de vida escolhido 	<ul style="list-style-type: none"> -complexidade na aplicação do método e no equipamento requerido -utilização vantajosa apenas em casos muito particulares -os custos associados à formulação são elevados -ainda não se comprovou com total exactidão a sua eficácia

Deve utilizar-se um método de formulação que conduza à obtenção duma mistura betuminosa com um comportamento otimizado em relação a determinadas características, escolhidas com base nas principais funções que a mistura desempenhará no pavimento. Assim, para pavimentos submetidos a um tráfego pouco intenso, as exigências em relação ao comportamento das misturas betuminosas são menores. Neste contexto a relação custo/qualidade aconselha a utilização de métodos de formulação menos complexos (tipo “receita”, empíricos, analíticos e volumétricos), obviamente sem estar comprometido o desempenho da mistura betuminosa.

Torna-se necessário ponderar, se em termos económicos, o investimento inicial na formulação vai ser compensado, através de um melhor e mais eficaz conhecimento de importantes propriedades já citadas, tais como a resistência à fadiga, resistência às deformações permanentes e módulo de deformabilidade. Neste caso, consegue-se obter um melhor desempenho das misturas betuminosas e conseqüente mais correcto dimensionamento do pavimento.

No âmbito da NP EN 1318-1, é recomendado que em Portugal a formulação das misturas betuminosas seja efectuada com base no método de Marshall. A partir de uma determinada composição dos diversos agregados constituintes, cuja mistura origine uma curva granulométrica que respeite o fuso respectivo (ver quadro 6 NP EN 1318-1, representado já de seguida), são fabricadas misturas betuminosas variando a percentagem de betume em torno do valor óptimo expectável, a partir de 5 percentagens de betume (com incrementos de 0,5%). Sobre as amostras dessas misturas betuminosas é determinada a baridade máxima teórica e são compactados 3 provetes por percentagem de betume, utilizando o método de impacto com energia de compactação definida na mesma norma. Sobre os provetes compactados, são determinadas as baridades e as características relacionadas com os vazios de provetes betuminosos. Os provetes são depois ensaiados à temperatura de 60°C, utilizando o ensaio de Marshall. Neste ensaio, impõem-se uma deformação vertical ao provete a uma velocidade de 51 mm/min, através dum carregamento de compressão diametral, até ocorrer a rotura. Os resultados deste

ensaio são a estabilidade Marshall (máxima carga para a qual ocorre a rotura do provete) e a deformação Marshall (deformação do provete para a qual ocorre a rotura).

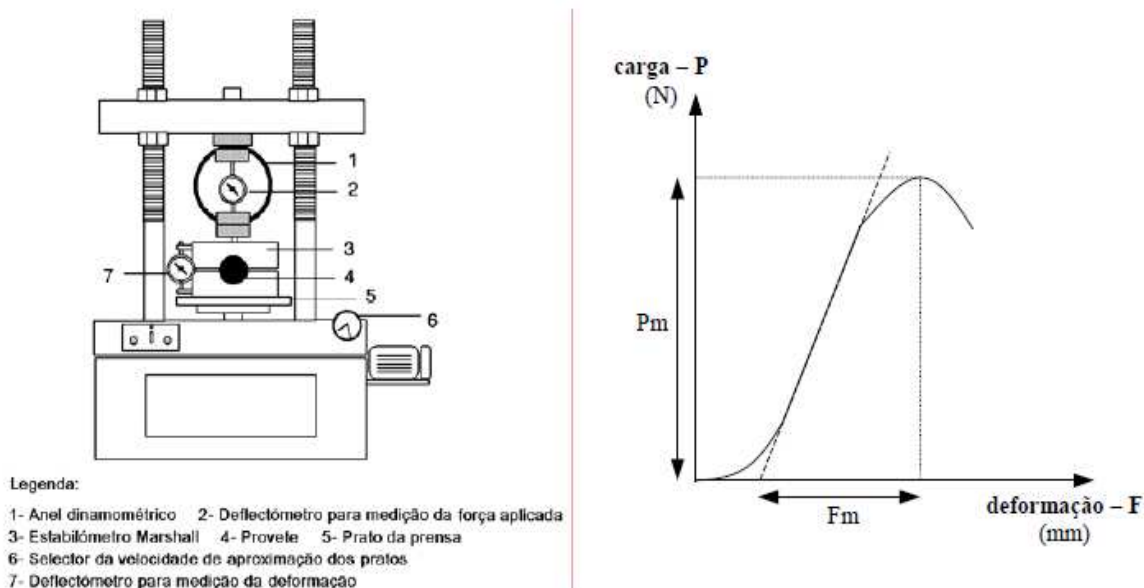


Fig.15 – Equipamento utilizado no ensaio de Marshall e esquema do resultado tipicamente obtido

Em seguida e para cada teor de betume em estudo, determinam-se os valores médios de baridade aparente, estabilidade, porosidade, deformação Marshall, volume de vazios no esqueleto mineral e volume de vazios preenchidos com betume (grau de saturação em betume), com os quais é possível traçar os gráficos apresentados na figura 16:

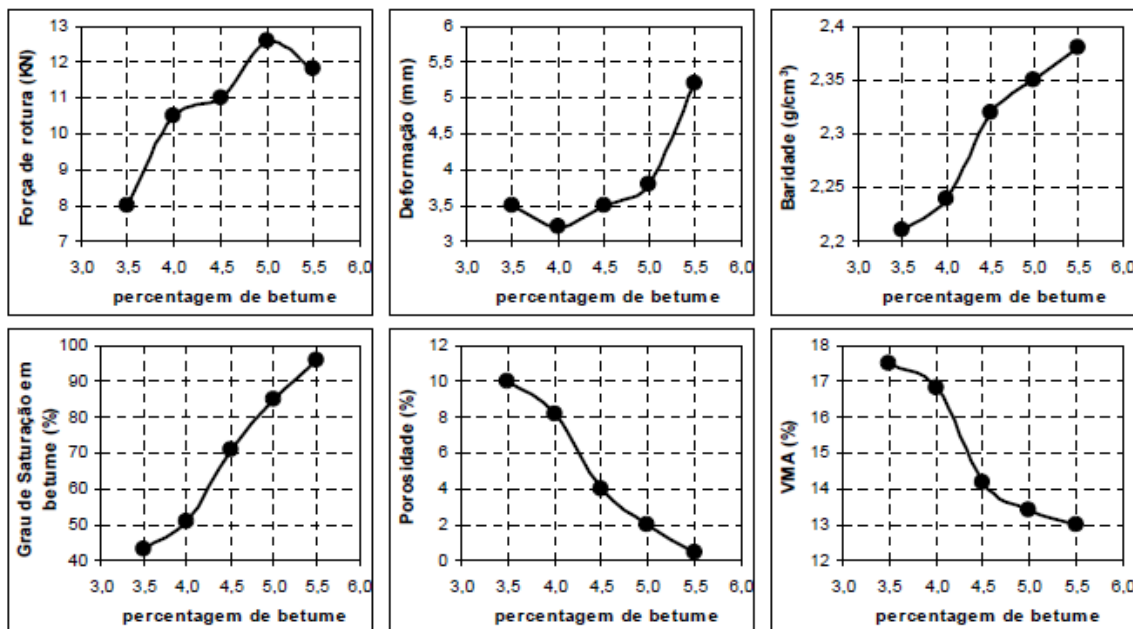


Fig.16 – Gráficos dos valores médios obtidos para cada teor de betume, relativos às variáveis estudadas no Método de Marshall

Com a excepção das misturas dos tipos AC 32 base ligante (MB) e AC 10 surf ligante (BBr), a percentagem “óptima” de betume será a que resulta da média dos valores das percentagens de betume que conduzem ao valor máximo da baridade da mistura betuminosa compactada, ao valor médio dos limites da porosidade e ao valor máximo correspondente à estabilidade Marshall.

Em Portugal actualmente a especificação do betão betuminoso é ainda realizado com base numa abordagem empírica, ou seja, define o betão betuminoso em termos de receitas de composição e requisitos para os materiais constituintes, combinados com requisitos adicionais baseados em ensaios relacionados com o desempenho.

Para as misturas nacionais já referenciadas, são especificados/recomendados no quadro 6, os correspondentes fusos granulométricos que devem ser respeitados.

Quadro 6 – Fusos granulométricos para misturas betuminosas

Peneiros Série Base+Série 2 (mm)	AC32 base ligante (MB)	AC20 base ligante (MB) ou AC20 reg ligante (MB) ou AC20 bin ligante (MB)	AC20 base ligante (MBAM)	AC16 reg ligante (MBAM) ou AC16 bin ligante (MBAM)	AC20 reg ligante (MBD) ou AC20 bin ligante (MBD)	AC14 reg ligante (BBsb) ou AC14 bin ligante (BBsb)	AC 14 reg ligante (BB) ou AC14 surf ligante (BB)	AC 14 surf ligante (BBr)	AC 10 surf ligante (BBr)
40	100	-	-	-	-	-	-	-	-
31,5	90-100	100	100	-	100	-	-	-	-
20	68-93	90-100	90-100	100	90-100	100	100	100	-
16	-	-	-	90-100	-	-	-	-	-
14	-	-	-	-	-	90-100	90-100	90-100	100
12,5	-	57-86	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	63-81	63-83	67-80	67-83	67-77	62-78	90-100
6,3	40-60	-	-	-	-	-	-	-	47-64
4	-	34-49	42-57	39-57	42-57	42-60	40-52	30-40	27-39
2	26-41	26-41	27-41	27-41	32-46	30-42	25-40	22-30	22-32
1	-	-	-	-	-	-	-	-	15-28
0,5	12-26	12-26	11-23	11-23	18-29	13-22	11-19	12-21	12-25-
0,125	4-14	4-14	7-13	7-12	7-14	7-13	6-11	7-13	-
0,063	2-7	2-7	5-9	5-9	5-9	5-9	5-8	4-9	7-11

7

DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS

7.1. INTRODUÇÃO

Com o decorrer dos anos tem havido uma grande evolução no que diz respeito aos processos de dimensionamento de pavimentos. Mais recentemente têm sido feitas novas abordagens com um bom potencial teórico, mas cuja aplicação não é de prática simples e apresentam também algumas fragilidades, isto é, para a sistematização da sua aplicação terá de haver ainda, uma indispensável validação prática.

Portanto, actualmente, tal como acontece no nosso país, o dimensionamento de pavimentos flexíveis é realizado por meio de métodos empírico-mecanicistas, entre eles, os mais usados são o método da Shell e da Universidade de Nottingham. Estes métodos designam-se por empírico-mecanicistas, devido a integrarem modelos de comportamento dos materiais e do pavimento no seu conjunto, embora sendo ainda ponderados com a experiência que resulta da observação do comportamento real dos pavimentos.

De referenciar que também existem métodos de aplicação mais simples e práticos, como o MACOPAV ou o programa PAVIFLEX, que serão tratados mais adiante.

O dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos rodoviários flexíveis consiste em seguir vários procedimentos com o objectivo de obter uma solução capaz de responder a certas exigências técnicas e económicas, embora assumindo algum risco controlado.

Para a geometria do pavimento inicialmente considerada, e após conhecidas as características de deformabilidade dos materiais que constituem a sua estrutura, determinam-se por via analítica, as tensões e as extensões induzidas nos materiais por acção do tráfego e sob a influência das condições climáticas. De seguida, é então verificado se os critérios de ruína pré-estabelecidos são ou não satisfeitos. A verificação destes critérios, procura limitar a possibilidade de ocorrência de degradações estruturais nas camadas dos pavimentos durante o seu período de vida útil, restringindo desta forma, a magnitude das tensões/extensões susceptíveis de serem impostas aos materiais. Na figura 17 apresenta-se um organograma que ilustra o procedimento típico de dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos flexíveis.

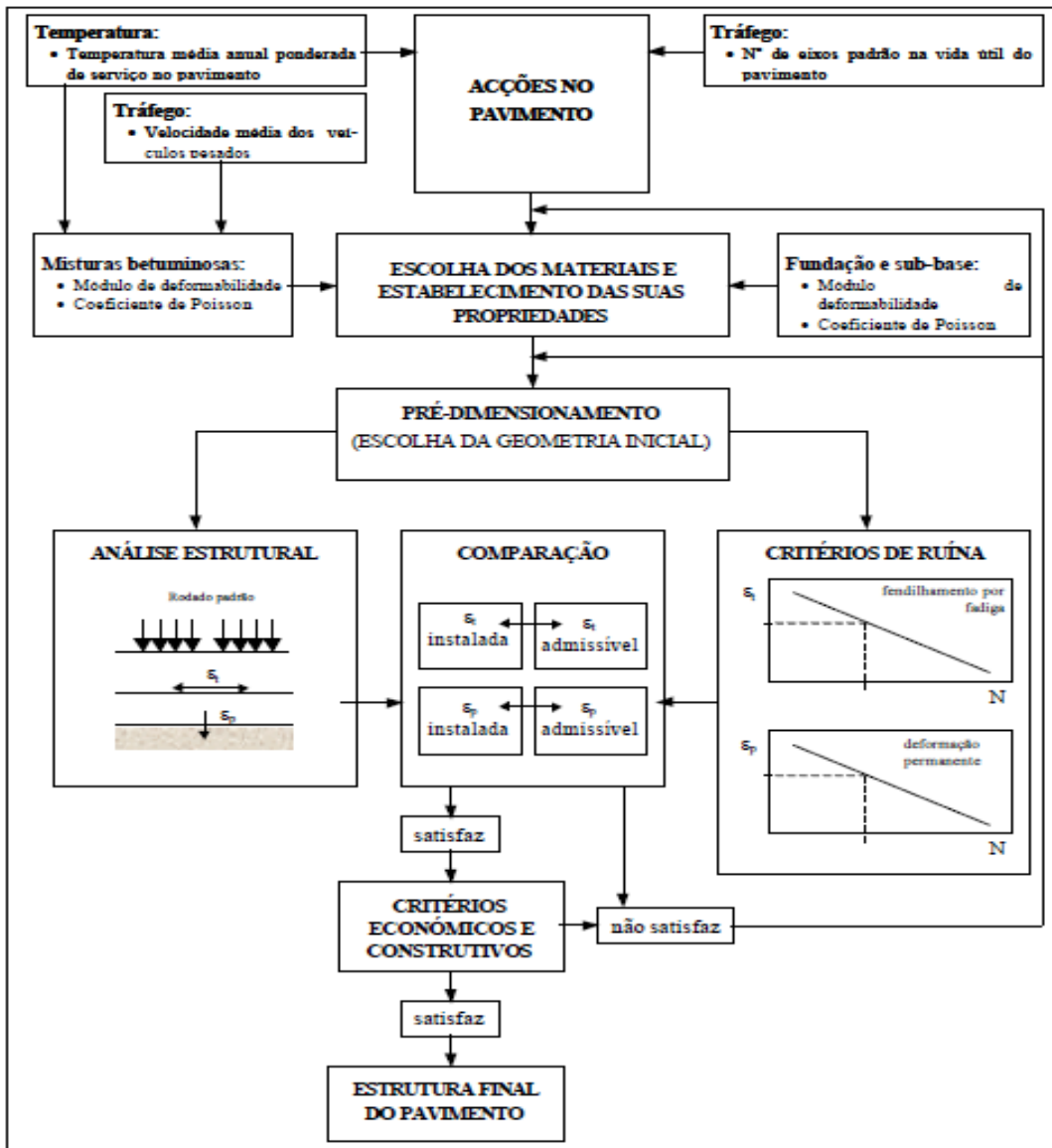


Fig.17 – Procedimento típico de dimensionamento empírico-mecanicista de pavimentos flexíveis (Branco)

7.2. DIMENSIONAMENTO EMPÍRICO-MECANICISTA DE PAVIMENTOS FLEXÍVEIS

Um processo empírico-mecanicista no dimensionamento de um pavimento flexível, é constituído pela ordem de passos que vão ser descritos:

I.

Em primeiro lugar, é necessário estabelecer as espessuras das camadas e composição dos materiais que constituem a estrutura a avaliar. No que toca às misturas betuminosas é necessário determinar a percentagem volumétrica do betume (v_b), a percentagem volumétrica dos agregados (v_a), o volume de vazios no esqueleto do agregado (VMA) e também escolher a penetração (pen25) e a temperatura de amolecimento anel e bola (TAB) que caracteriza o tipo de betume utilizado. Na construção rodoviária portuguesa o tipo de estruturas que geralmente mais se utilizam são constituídas por: uma camada de desgaste em betão betuminoso de 5cm (podendo ter 4cm para tráfego leve ou 6cm para tráfego

intenso); dependendo da espessura, ou uma camada de regularização ou de base em mistura betuminosa densa ou macadame betuminoso; e inferiormente, por uma camada de sub-base constituída por uma ou duas camadas granulares de agregado britado de granulometria extensa, normalmente com espessuras de 15 ou 20 cm (30 ou 40 em duas camadas). Obviamente, todas estas camadas assentam num solo de fundação, ou caso seja necessário melhoramento, num leito de pavimento.

II.

Depois é necessário avaliar, como já foi relatado no capítulo 3, o número de carregamentos expressos em passagens de um eixo-padrão, que solicitam o pavimento durante a sua vida útil, N80 (sendo considerando neste caso um eixo-padrão de 80KN), e a temperatura de serviço para o local de dimensionamento.

III.

Para o dimensionamento procuram-se os módulos que caracterizam as condições previsíveis, quer em termos de temperatura de serviço, quer em termos de velocidade com que os carregamentos são aplicados. Assim, os métodos de dimensionamento de pavimentos empírico-mecanicistas usam fórmulas de previsão dos módulos de deformabilidade das misturas betuminosas, obtidos por regressão dos resultados de cargas repetidas. Para isso é utilizado o conceito de rigidez do betume (Sb), que é determinado pelo seguinte ábaco de Van der Poel ou simplesmente através da expressão:

$$S_b = 1,157 \times 10^{-7} \times t^{-0,368} \times 2,718^{-IP} \times (T_{AB} - T)^5 \quad (13)$$

Onde,

Sb – rigidez do betume em Mpa

t – tempo de carregamento em segundos

T – temperatura de serviço do material, em °C

IP – índice de penetração do betume da mistura betuminosa (calculado pela expressão 14) proposta por Pfeiffer e Van Dormal

TAB – temperatura de amolecimento do betume pelo método do anel e bola, em °C

Sendo,

$$IP = \frac{20 \times T_{AB} + 500 \times \log(\text{pen}_{25}) - 1955,55}{T_{AB} - 50 \times \log(\text{pen}_{25}) + 120,15} \quad (14)$$

Onde,

TAB – temperatura de amolecimento do betume pelo método do anel e bola, em °C

pen25 – penetração do betume a 25 °C, em 10⁻¹ mm

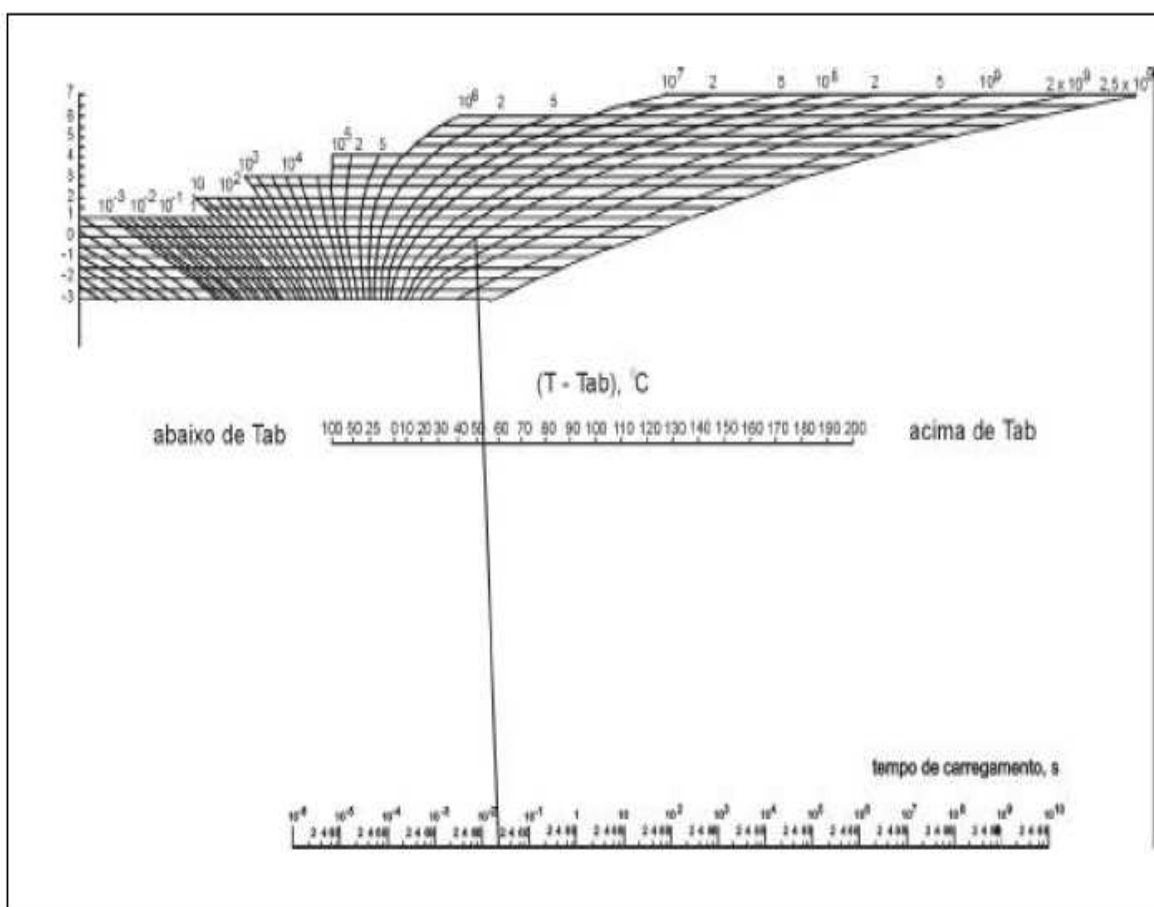


Fig.18 – Ábaco de Van der Poel para a determinação da rigidez do betume

A expressão 13, é válida para valores de IP entre -1 e +1, para valores de TAB-T compreendidos entre -20 e 60 °C e para tempos de carregamento (t) entre 0,01 e 0,1 segundos.

No dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis interessa conhecer as características de rigidez da mistura em condições de serviço. Como o valor determinado no ábaco não considera o endurecimento do betume motivado pelas operações de fabrico e colocação das misturas betuminosas, então Brown e Pell propuseram para o Reino Unido as seguintes considerações, que também podem ser aplicadas às condições portuguesas:

$$\text{pen}_{25r} = 0,65 \times \text{pen}_{25} \quad (15)$$

$$T_{ABr} = 99,13 - 26,35 \times \log(\text{pen}_{25r}) \quad (16)$$

Onde,

pen_{25r} – penetração do betume recuperado a 25 °C, em 10⁻¹ mm

TABr – temperatura de amolecimento do betume recuperado pelo método do anel e bola, em °C (O termo recuperado pretende significar que a característica do ligante foi determinada sobre amostras extraídas de pavimentos em serviço)

O tempo de carregamento (t) pode ser calculado pela expressão 17 proposta pela Universidade de Nottingham:

$$t = \frac{1}{v} \quad (17)$$

Onde,

t – tempo de carregamento, em s

v – velocidade média da corrente de tráfego pesado, em km

A velocidade para a corrente de tráfego pesado (v) normalmente utilizada é de 50 km/h. Para as situações abaixo indicadas, são ainda propostos os seguintes valores para os tempos de carregamento (t):

- Estradas com circulação “rápida”: de 0,01 s (100 km/h) a 0,10 s (10 km/h);
- Tráfego do tipo “para-arranca”: de 0,10 s (10 km/h) a 1 minuto (1 km/h);
- Parque de estacionamento: de 1 minuto a 10 horas.

Com o valor calculado da rigidez do betume S_b , é possível então como se disse, determinar o valor do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas. Serão analisados dois dos métodos mais importantes no nosso país, o da Shell e da Universidade de Nottingham.

No caso do método empírico-mecanicista da Shell, a previsão do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas, propôs o nomograma que se representa na figura 19, no qual aquela propriedade mecânica pode ser determinada com base na rigidez do betume e nas percentagens volumétricas de betume e de agregado. Como se pode observar, aquele ábaco só permite valores de S_b não inferiores a 5 MPa. O nomograma referido foi elaborado a partir de resultados obtidos em ensaios de flexão de provetes trapezoidais em consola, utilizando uma larga gama de misturas. Em alternativa, podem usar-se as expressões 18 e 19 obtidas por Bonnaure, estando a sua aplicação limitada a valores de S_b superiores a 5 MPa e inferiores a 3000 MPa. As situações previstas resumem-se do seguinte modo:

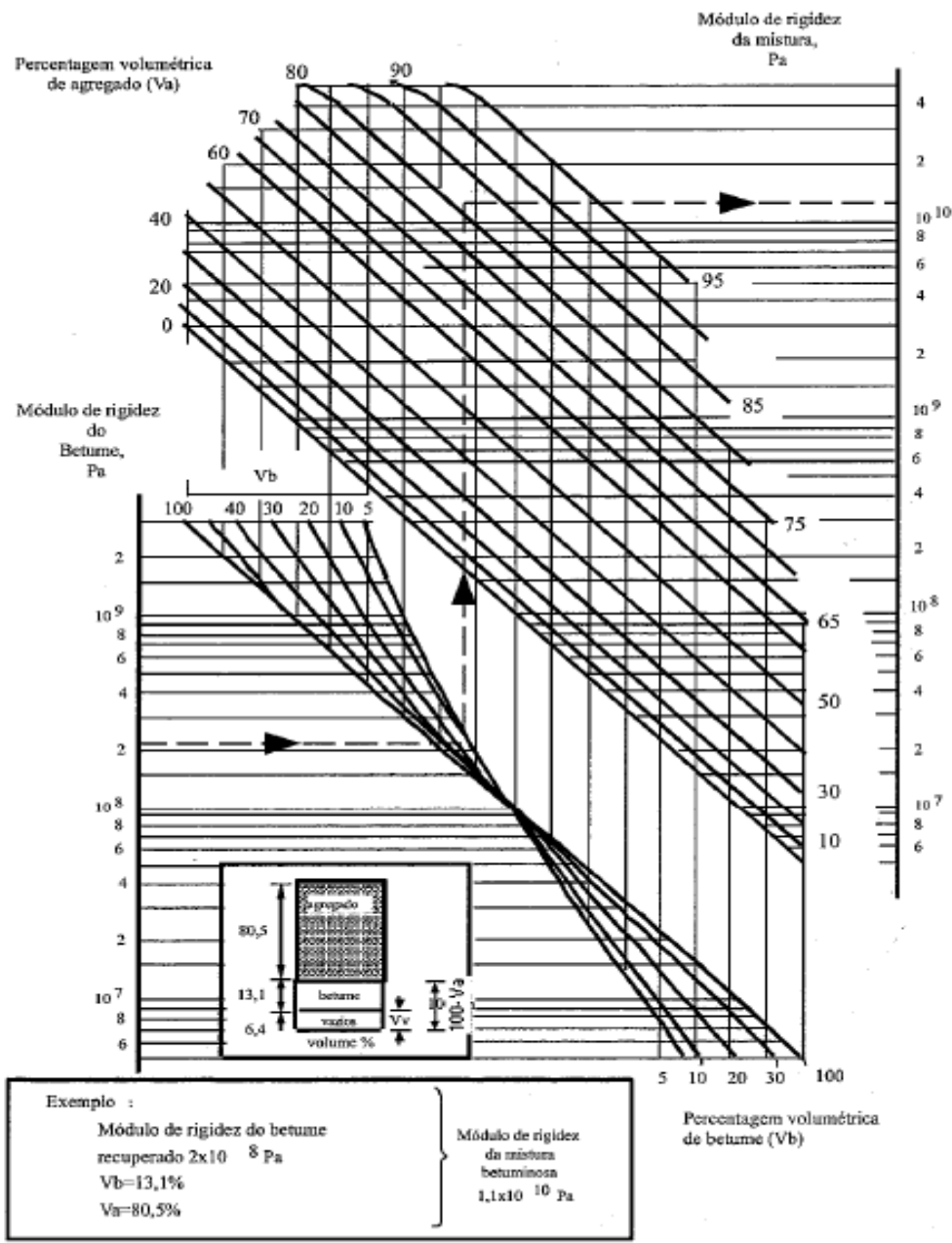


Fig.19 – Ábaco para a previsão do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, segundo o manual de dimensionamento da Shell

No caso de $5 < S_b < 1000$ (Mpa) :

$$E_{mista} = 10^A \quad (18)$$

Sendo,

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

No caso de $1000 < S_b < 3000$ (Mpa) :

$$E_{mist} = 10^B \quad (19)$$

Sendo,

$$B = (Sm3109 - Sm108 - S89) \times \frac{\log S_b - 9}{\log 3} + Sm108 + S89$$

$$S89 = 1,12 \times \frac{(Sm3109 - Sm108)}{\log 30}$$

$$S68 = 0,6 \times \log \left(\frac{1,37 \times V_b^2 - 1}{1,33 \times V_b - 1} \right)$$

$$Sm3109 = 10,82 \cdot \frac{1,342 \times (100 - V_a)}{V_a + V_b}$$

$$Sm108 = 8 + 5,68 \times 10^{-3} \times V_a + 2,135 \times 10^{-4} \times V_a^2$$

Onde,

V_a – percentagem volumétrica de agregado

V_b – percentagem volumétrica de betume

Emist – módulo de deformabilidade das misturas betuminosas, em Pa

S_b – rigidez do betume, em Pa

O limite superior da validade da expressão tem a ver com o facto de não serem exequíveis valores de S_b superiores a 3000 Mpa. Para valores da rigidez do betume inferiores a 5 MPa, não se dispõe de solução com base nestas expressões, pois nesta situação, os materiais têm um comportamento não linear e, por isso, o seu módulo deveria ser previsto de forma experimental com recurso a ensaios próprios. No entanto, Picado Santos aplicou um procedimento simplificado que, embora de forma aproximada, permite prever o módulo duma mistura betuminosa para aquelas condições. A metodologia utilizada consistiu na utilização da relação estabelecida no manual de dimensionamento da Shell que se traduz pela figura 20.

Pode observar-se que, na escala bi-logarítmica representada, para valores de S_b inferiores a 10 MPa, o módulo de deformabilidade da mistura (Emist) varia de forma aproximadamente linear com a rigidez do betume. Assim, para cada tipo de mistura, o valor de Emist pode ser determinado através da equação da recta, representada naquela escala bi-logarítmica, que passa pelos pontos de coordenadas (S_b = 5 MPa, Emist = f (S_b = 5 MPa)) e (S_b = 10 MPa, Emist = f (S_b = 10 MPa)). Depois de conhecida a recta, o valor do módulo de deformabilidade da mistura pode ser obtido substituindo na equação o valor de S_b quando este é inferior a 5 MPa.

Em termos gerais, pode afirmar-se que as misturas do tipo S1 representadas na figura seguinte, são densas, com uma percentagem de betume superior a 4,5%, enquanto que as do tipo S2 são abertas, com uma percentagem de betume até 4%.

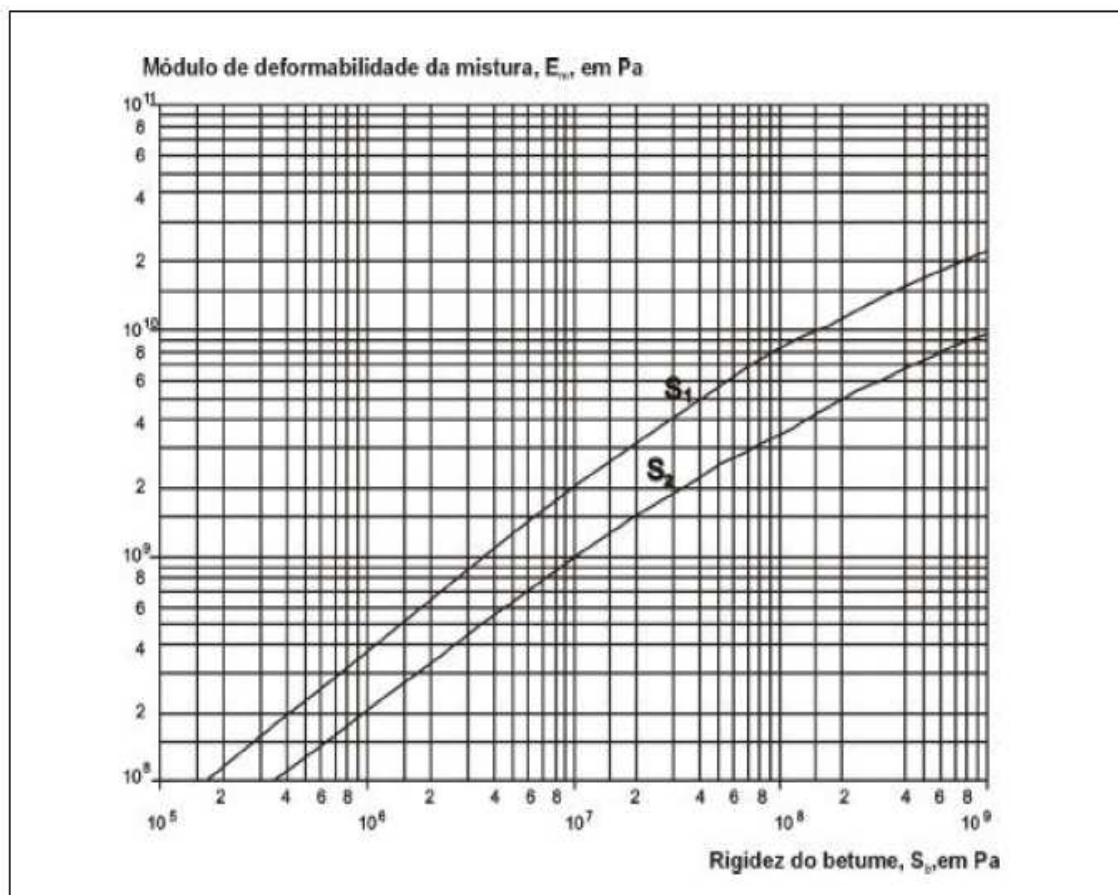


Fig.20 – Variação do módulo de deformabilidade das misturas betuminosas com a rigidez do betume, para as classes S1 e S2 do manual de dimensionamento da Shell (Branco)

Relativamente ao método mecanicista da Universidade de Nottingham, é habitual usar-se a expressão:

$$E_{mist} = S_b \times \left(1 + \frac{257,5 - 2,5 \text{ VMA}}{n (\text{VMA} \cdot 3)} \right)^n \quad (20)$$

Sendo,

$$n = 0,83 \times \log \left(\frac{4 \times 10^4}{S_b} \right)$$

Onde,

E_{mist} – módulo de deformabilidade da mistura betuminosa, em MPA

S_b – rigidez do betume, em MPA

VMA – vazios na mistura de agregados no estado compactado, em %

A expressão 20 é aplicável quando a rigidez do betume é superior a 5 MPa. Além disso, o VMA deve estar compreendido entre 12 e 30%, o que, aliás, acontece em grande parte das situações. Assume-se que as características do agregado, como o seu tipo e a sua granulometria, entre outras, não devem influenciar directamente o valor do módulo de deformabilidade da mistura. Contudo, se aqueles factores tiveram efeito sobre o grau de compactação, isto é, sobre o VMA que é possível obter, a sua influência é tida em conta, embora duma forma indirecta.

A partir da mesma expressão (20) os seus autores desenvolveram nomogramas (figura 21) que podem ser usados em alternativa àquela equação, para estimar o módulo de deformabilidade duma mistura betuminosa.

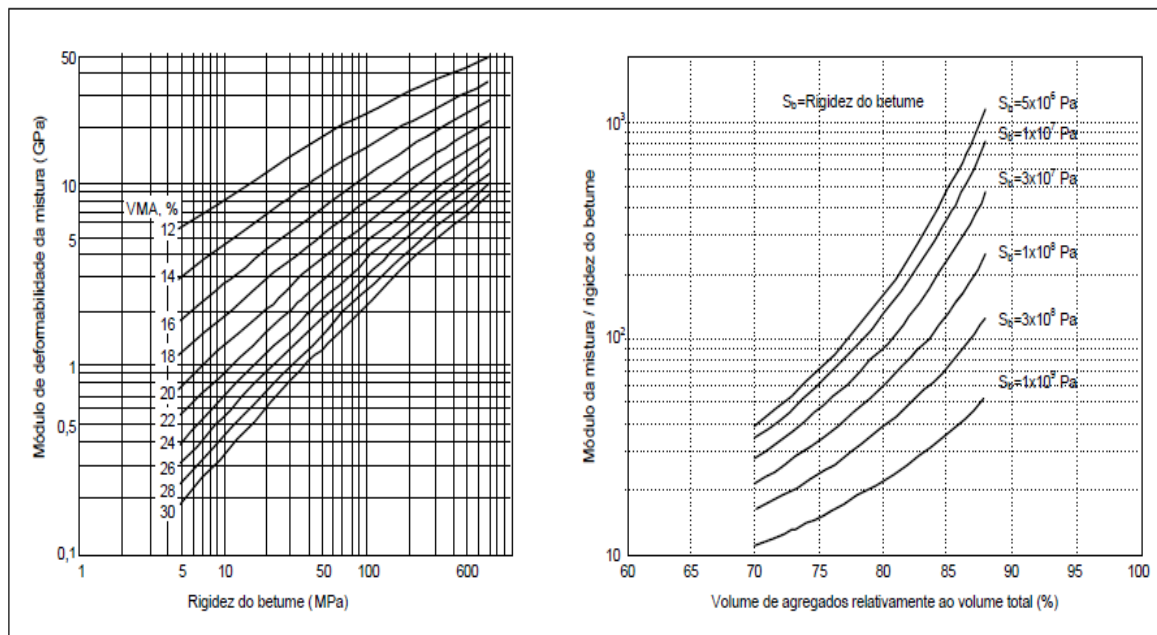


Fig.21 – Nomogramas para previsão do módulo de deformabilidade de misturas betuminosas

Quanto ao coeficiente de Poisson, frequentemente assume-se um valor que pode variar de 0,35 (temperatura < 20°C) a 0,40 (temperatura > 20°C e penetração 40/50).

Para que se tenha uma completa definição das características mecânicas de todo o pavimento, falta ainda a definição do módulo de deformabilidade e do coeficiente de Poisson da camada de fundação e das camadas constituídas pelos materiais granulares.

O estado de tensão e deformação instalado em cada um dos pontos do pavimento, para além de depender naturalmente da rigidez da própria estrutura, que é formada por uma reduzida espessura (30 a 60 cm), depende fortemente da resistência da camada de fundação, assumindo esta também um papel importante no desempenho e dimensionamento de pavimentos. O conhecimento da sua capacidade de suporte é necessária para dimensionar pavimentos, sendo que a fixação do módulo de deformabilidade da fundação pode ser feita tendo em conta fórmulas previsionais, traduzidas por estas expressões:

$$E_f = 5 \text{ a } 6 \times \text{CBR} \quad (21)$$

$$E_f = 17,6 \times \text{CBR}^{0,64} \quad (22)$$

A segunda expressão é mais conservadora que a primeira, e tem sido validada para solos com semelhanças aos solos de fundação do território nacional.

No que diz respeito ao coeficiente de Poisson, normalmente é adoptado um valor que se situa entre 0,35 (CBR >15%) e 0,45 (CBR < 15%).

Quanto ao tratamento das sub-bases, o módulo de deformabilidade destas camadas granulares (E_g) pode ser determinado em função do módulo de deformabilidade da fundação (E_f) e da própria espessura da camada granular sobre o solo de fundação. A expressão é a seguinte:

$$E_g = k E_f \quad (23)$$

Sendo,

$$K = 0,2 \times h_g^{0,45}$$

Onde,

h_g – espessura da camada granular sobre o solo de fundação, cujo valor deve ser expresso em mm

O valor do coeficiente de Poisson geralmente considerado, varia entre 0,30 e 0,35 para as camadas de agregado britado de granulometria extensa.

IV.

Depois de todas as camadas completamente caracterizadas mecanicamente, é necessário calcular o estado de tensão-deformação nos pontos do pavimento alvo de análise. Geralmente para a sua determinação através de cálculos automáticos, são adoptadas as seguintes considerações: as propriedades do material de determinada camada são homogéneas, considerando-se cada camada como isotrópica; cada camada, exceptuando a última tem uma espessura finita; cada camada tem uma dimensão infinita na direcção transversal; pode haver fricção total entre as camadas ou não; a relação tensão-extensão e conseqüentemente o comportamento mecânico dos materiais das camadas é caracterizado pelo módulo de deformabilidade e pelo coeficiente de Poisson. Podem ser usados um dos programas de cálculo automático, para a determinação do estado de tensão, tal como o ELSYM5 (Universidade da Califórnia), o BISAR (Shell), o DAMA (Asphalt Institute), o ANPAD (Universidade de Nottingham) ou então o ECOROUTE (Lambert, M.; Jeuffroy, G.). Assim, é possível determinar as extensões que interessam para o dimensionamento pretendido, que, lembrando, são a extensão horizontal de tracção na base das camadas betuminosas (ϵ_t) e a extensão vertical de compressão no topo da fundação (ϵ_z).

V.

Os métodos de dimensionamento empírico-mecanicistas, consideram que as situações limite em relação aos quais os pavimentos são analisados, podem ser traduzidas por uma lei de fadiga e por uma lei de deformação permanente, que para cada material, relacionam o valor da extensão instalada num carregamento com o número de vezes que ela pode ser repetida até à ruína do material. A Universidade de Nottingham estabeleceu uma expressão para a previsão do comportamento à fadiga de misturas betuminosas. Tal lei é de uso corrente no nosso país para o dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis. A relação estabelecida tomou a seguinte forma:

$$\log \varepsilon_t = \frac{14,39 \times \log V_b + 24,2 \times \log T_{AB} - c - \log N}{5,13 \times \log V_b + 8,63 \times \log T_{AB} - 15,8} \quad (24)$$

Onde,

N – número de carregamentos até à ocorrência de rotura por fadiga (em milhões – $\times 10^6$)

V_b – percentagem volumétrica de betume

ε_t – extensão de tracção aplicada (em micro unidades – $\times 10^{-6}$)

T_{AB} – ponto de amolecimento anel e bola do betume, em °C

c = 46,82, para N provocando condições críticas

c = 46,06, para N provocando a ruína

Os dois valores possíveis para o parâmetro *c* são função das hipóteses consideradas para o estado do pavimento no final da sua vida útil.

O estado de ruína, corresponde à ocorrência dum cavado de rodeira com 20 mm de profundidade ou a condições de fendilhamento generalizada (do tipo pele de crocodilo) na zona de passagem dos rodados dos veículos. Nesta situação, admite-se que o pavimento não é susceptível de recuperação, pelo que há necessidade da sua substituição total. Corresponde a uma probabilidade de sobrevivência de 50 a 60%.

A segunda situação, estado crítico, caracteriza-se pelo aparecimento duma rodeira com 10 mm de profundidade ou pela ocorrência de algumas fendas na zona de passagem das rodas. Estas condições referem-se a um estado de degradação em que será conveniente o reforço do pavimento, sendo nesta fase que a degradação do mesmo começa a decorrer com maior rapidez. Esta situação corresponde a uma probabilidade de 85% de não haver necessidade de reforçar a estrutura antes do final da vida útil considerada

A lei de fadiga traduzida pela expressão 24, considera já os ajustamentos necessários à adaptação dos resultados dos ensaios laboratoriais às condições reais de solicitação dos pavimentos. No estado de ruína, a vida útil real (número admissível de repetições de carga) pode tomar-se 440 vezes superior à vida determinada em laboratório, enquanto que para as condições críticas aquele valor é de 77. Os coeficientes de ajustamento derivam do facto de, nos pavimentos em serviço, as condições de solicitação serem menos gravosas que em laboratório, nomeadamente pela ocorrência de períodos de repouso (factor de majoração de 20 para os dois estados de deterioração), pelo facto do fendilhamento demorar algum tempo a atingir toda a espessura da camada betuminosa (factor de 20 e 3,5, respectivamente para o estado de ruína e para o estado crítico) e pela distribuição lateral de passagem dos rodados (factor de 1,1 para ambas as situações terminais).

Apresenta-se também um nomograma (figura 22) desenvolvido na Universidade de Nottingham para prever a “vida à fadiga” duma mistura betuminosa para as condições de ruína.

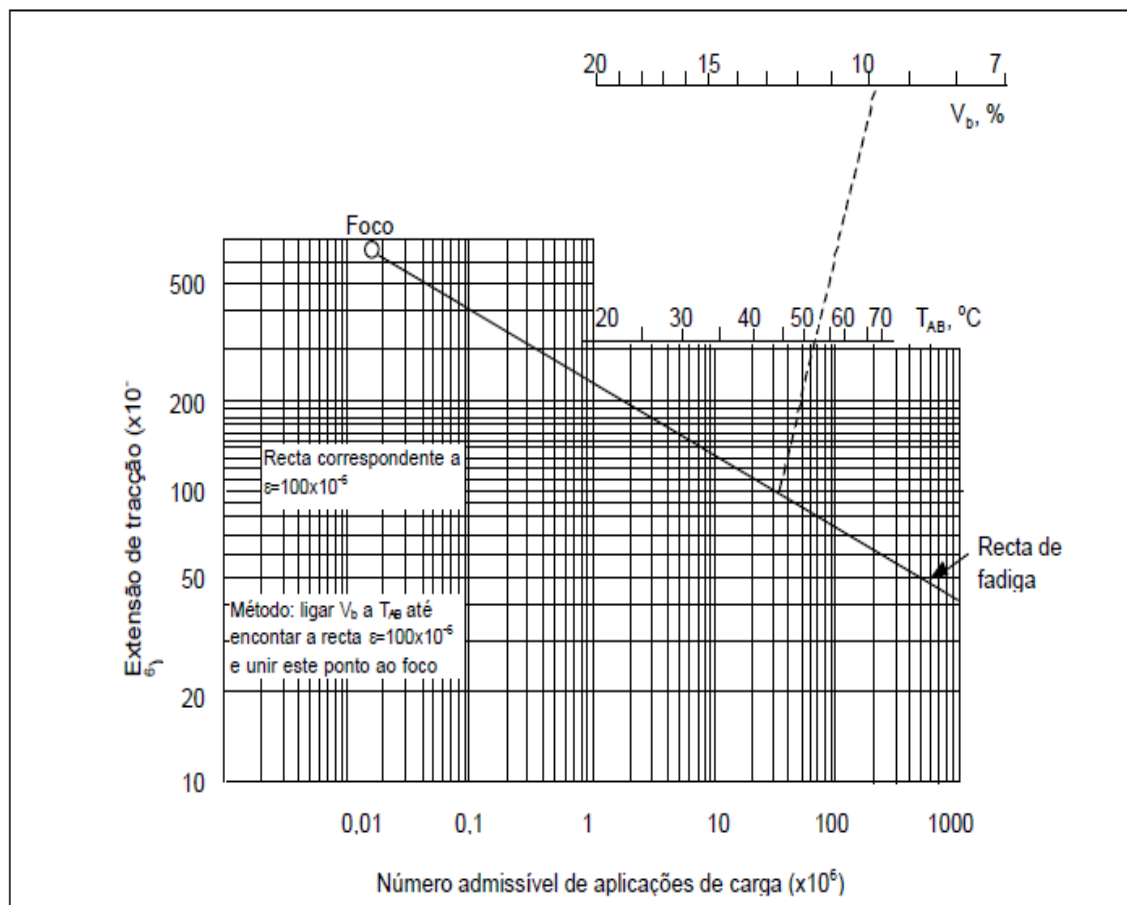


Fig.22 – Nomograma para determinação da vida à fadiga duma mistura betuminosa

A lei de fadiga, proposta pela Shell, é uma das mais conhecidas. A vida duma camada betuminosa à fadiga é função do nível de extensão, da quantidade de betume e do módulo de deformabilidade da mistura. Este modelo pode ser expresso pela seguinte equação:

$$\epsilon_t = \frac{0,856 \times V_b + 1,08}{E_{mist}^{0,36} \times N^{0,2}} \quad (25)$$

Onde,

N – número de carregamentos até à ocorrência de rotura por fadiga

Vb – percentagem volumétrica de betume

Et – extensão de tracção aplicada (adimensional)

Emist – módulo d deformabilidade da mistura betuminosa (em Pa)

Tratando-se duma lei obtida em laboratório a partir de resultados de ensaios realizados com uma roda de vai-vem aplicada sobre lajes de material betuminoso, há ainda que considerar factores de conversão

para ter em conta as condições de serviço. Assim, são propostos os seguintes ajustes para a adaptação à realidade:

- Distribuição lateral do tráfego: deve multiplicar-se a vida útil por 2,5;
- Efeito benéfico de períodos de repouso entre carregamentos: para misturas densas com grande teor em betume deve multiplicar-se a vida útil por 10 e para misturas abertas e pobres em betume deve multiplicar-se a vida útil por 1,25;
- Influência dos gradientes de temperatura: deve dividir-se a vida útil por 2 no caso de temperaturas altas e/ou camadas betuminosas espessas.

A figura 23 representa um nomograma desenvolvido pela Shell que traduz o comportamento à fadiga das misturas betuminosas, podendo ser utilizado em substituição da expressão 25 acima apresentada, para estimar a vida à fadiga.

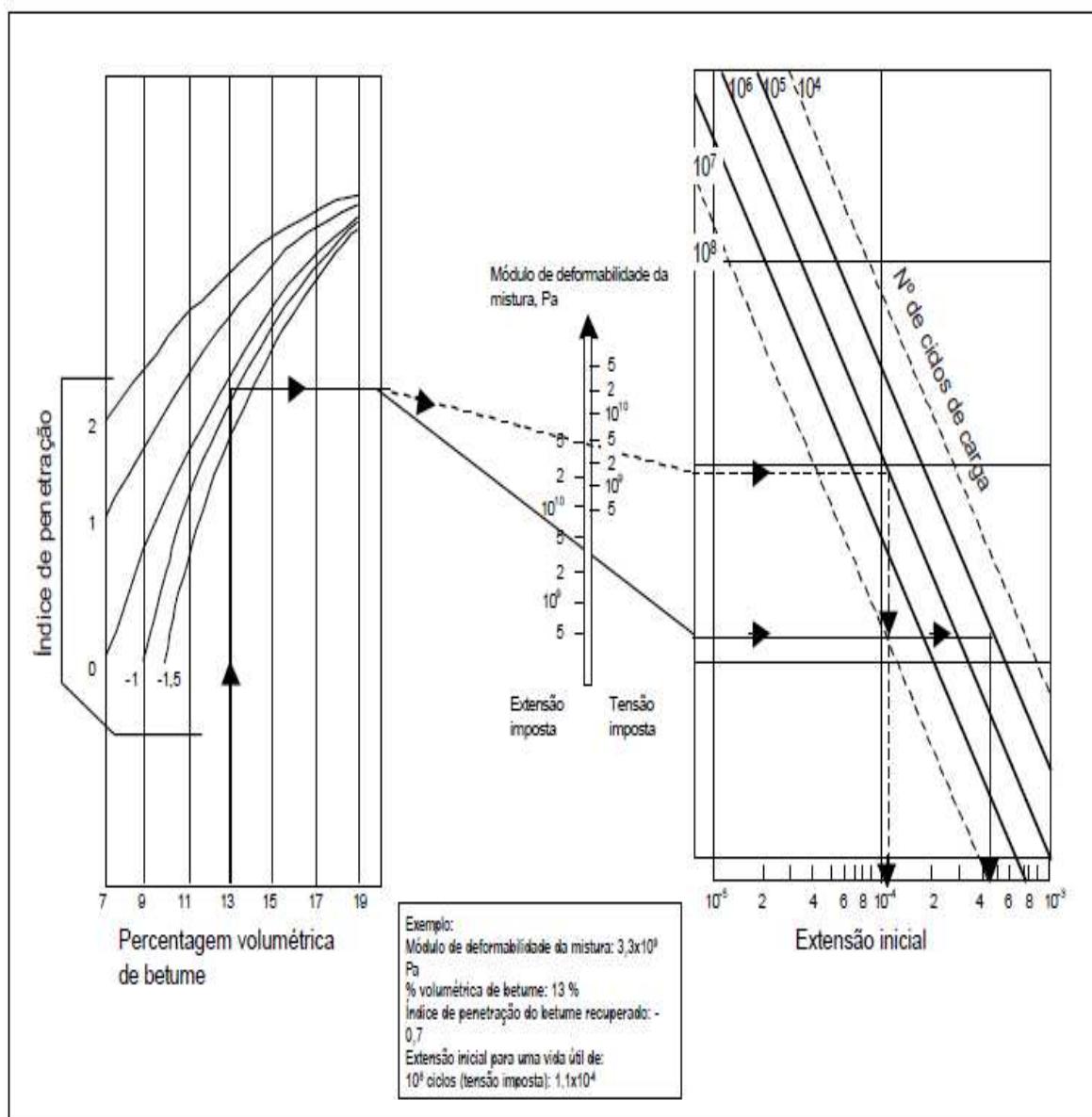


Fig.23 – Nomograma para a previsão do desempenho à fadiga de misturas betuminosas em ensaios laboratoriais

O método de Nottingham expressa o critério de ruína por deformação permanente pela expressão 26, que relaciona a extensão de compressão no topo do solo de fundação (ϵ_z), com a vida útil, sendo esta dada pelo número de eixos padrão N:

$$\epsilon_z = \frac{A}{\left(\frac{N}{fr}\right)^c} \quad (26)$$

Onde,

ϵ_z – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação (em micro unidades – $\times 10^{-6}$)

N – número de eixos padrão (milhões – $\times 10^6$)

fr – factor de indução de assentamento

A = 250, para N provocando estado crítico (10 mm de rodeira)

A = 451,29, para N provocando estado de ruína (20 mm de rodeira)

C = 0,27, para N provocando estado crítico

C = 0,28, para N provocando estado de ruína

Para as misturas utilizadas no Reino Unido, designadamente o betão betuminoso (hot rolled asphalt) e o denso bitumen macadam, Brown propõe a adopção de valores de fr de 1,0 e 1,56, respectivamente. Por analogia com a situação portuguesa, habitualmente usa-se fr=1,5 para macadame betuminoso, fr=1,3 para mistura betuminosa densa para camada de regularização, e fr=1,0 para betão betuminoso para camada de desgaste.

Analogamente, a lei de deformação permanente estabelecida pela Shell relaciona a extensão vertical de compressão medida no topo do solo de fundação (ϵ_z), com o número de eixos padrão (N), e traduz-se pela expressão:

$$\epsilon_z = k_1 \times N^{-0,25} \quad (27)$$

Onde,

ϵ_z – extensão vertical de compressão no topo do solo de fundação

N – número de eixos padrão

Neste método, o critério de ruína por deformação permanente é assumido de modo a obter uma determinada probabilidade de sobrevivência do pavimento, fixada à partida. Para que este critério de ruína não seja excedido, com determinada confiança, são utilizados os seguintes valores para k1:

- $k_1 = 1,8 \times 10^{-2}$ (probabilidade de sobrevivência de 95%)
- $k_1 = 2,1 \times 10^{-2}$ (probabilidade de sobrevivência de 85%)
- $k_1 = 2,8 \times 10^{-2}$ (probabilidade de sobrevivência de 50%)

Quando se utiliza a expressão 27, admite-se que é suficiente verificar a extensão no topo do solo de fundação para representar o mecanismo de ruína do pavimento por deformação permanente.

Em Portugal, habitualmente, o dimensionamento dos pavimentos efectua-se com a utilização dos critérios da shell (no caso da deformação permanente, para uma probabilidade de sobrevivência de 95%) quando se pretender assumir um risco normal. Já, se desejar-se adoptar um risco mais baixo que o normal, usam-se os critérios de Nottinham por serem mais conservadores.

VI.

O dimensionamento do pavimento tem como objectivo a definição da sua composição (espessuras das camadas e materiais) de modo a evitar que, para o número de carregamentos previsto durante a vida do pavimento, as degradações ultrapassem certos limites aceitáveis. Assim, através das leis acabadas de descrever, é possível obter-se o número máximo ou admissível de passagens do eixo-padrão (N_a). Este valor, determinado no passo anterior (5) é comparado com o número de eixos-padrão que na realidade, previsivelmente, solicitarão o pavimento durante a sua vida útil (N_{80} ou N_p), valor este determinado no passo 2. Sabendo estas duas quantidades, é possível obter-se o dano D , calculável através da expressão:

$$D = \frac{N_p}{N_a} \times 100 \quad (28)$$

Se o valor que previsivelmente solicitará o pavimento, for semelhante e ligeiramente inferior ao valor admissível o pavimento está bem dimensionado. Mas se for muito inferior (menor que 80%) ou então superior, considera-se que a estrutura está sobredimensionada, o que representa uma situação anti-económica, ou subdimensionada respectivamente. Em qualquer destes casos é necessário intervir, diminuindo ou aumentando a espessura das camadas ou alterando o tipo de materiais ou mesmo o tipo de pavimento. Até se chegar a um dimensionamento conveniente, o mais comum é alterar a camada de regularização ou camada de base, sendo assim alterada também a temperatura de serviço nas camadas betuminosas, por esta diferir para diferentes profundidades. Evidentemente, com esta modificação, há que recomeçar o “processo” desde o terceiro passo.

7.3. DIMENSIONAMENTO DE PAVIMENTOS ATRAVÉS DE MÉTODOS MAIS EXPEDITOS

Tal como, já foi referenciado, existem métodos de dimensionamento mais simples que os acabados de descrever. São utilizados sobretudo como soluções aproximadas de dimensionamento, indicadores de pré-dimensionamento, estudos prévios ou de viabilidade. Estes processos que visam orientar a concepção das estruturas dos pavimentos de forma mais simples e expedita, contemplam os principais passos envolvidos no dimensionamento empírico-mecanicista, quanto à escolha dos materiais, quantificação das acções, análise estrutural e verificação.

Nestas formas mais simples de obter as estruturas, temos no nosso país como referência, o manual de concepção de pavimentos da JAE (MACOPAV), e no estrangeiro, há algumas que são mesmo a referência para o dimensionamento dos pavimentos dos respectivos países, tais como: o procedimento espanhol (DGC, 2002), o procedimento francês (LCPC, 1998) e o inglês (HA, 2001).

No entanto, estudos realizados mais recentes, vieram a provar que as soluções definidas no MACOPAV podem não ser as mais correctas devido sobretudo a existirem deficiência/falhas relativamente à consideração das acções. Assim foi desenvolvido um programa chamado PAVIFLEX

(programa de cálculo automático de pavimentos flexíveis), que pretendeu ser-lhe uma alternativa e trazer melhorias quanto à obtenção de estruturas.

No MACOPAV, as acções a que um pavimento rodoviário flexível é sujeito durante a sua vida útil, são representadas no dimensionamento, por um valor único e equivalente. Esta não é uma modelação rigorosa das acções porque não contempla a variação das mesmas. O programa PAVIFLEX, na tentativa de definir uma solução que mais se aproxime da solução final, aplica um modelo de distribuição horário do tráfego e inclui um método de cálculo, hora a hora e em profundidade, da temperatura de serviço do pavimento (desenvolvidos por Picado Santos).

Relativamente ao tratamento do tráfego, tanto no MACOPAV como no programa PAVIFLEX, é determinado o número acumulado de passagens do eixo-padrão durante o período de dimensionamento para a via mais solicitada, da forma como se explicou no capítulo 3. A diferença, é que no programa PAVIFLEX, é incorporada a referida variação horária do tráfego de forma mais rigorosa, aplicando um modelo de distribuição horário cujos valores da distribuição percentual horária do TMDA médio são indicados no quadro 2 e figura 2 expostos no mesmo capítulo.

Quanto ao tratamento da temperatura, verificam-se maiores diferenças. É que o MACOPAV define uma temperatura de serviço de 25°C, sendo as soluções independentes do local da obra. Logo, este factor apenas condiciona na determinação do tipo de betume que é utilizado. Sabe-se porém que em Portugal, a temperatura de serviço apresenta uma variação espacial significativa, que torna importante ser levada em conta. Assim, podem ser usados no programa PAVIFLEX, dois métodos de modelação da temperatura representativa das camadas betuminosas dum pavimento flexível: PETE – processo de temperatura equivalente; e PATED – processo de distribuição de temperatura equivalente. Com eles, é possível fazer-se uma distribuição horária para a temperatura mensal, considerando para cada mês uma distribuição representativa de 24 horas, em que o valor em cada hora para a temperatura no pavimento, a cada profundidade, é obtido em função do valor estimado para a temperatura do ar para a mesma hora. De entre um grupo de 40 localizações possíveis de escolha, é definida qual a temperatura de serviço dominante. Esta integra um conjunto de zonas distintas e representativas dessa mesma temperatura, designadamente zona quente, zona média e zona temperada.

Recentemente, foram feitas análises comparativas dos resultados do MACOPAV com os do programa PAVIFLEX, sendo possível constatar que no MACOPAV as estruturas determinadas e propostas, são em algumas situações extremamente sobredimensionadas e noutras subdimensionadas. Isto deve-se em grande parte, como se mencionou, por serem definidas para uma temperatura única, traduzindo-se assim em soluções estruturais não diferenciadas para todo o país.

Pode dizer-se que, a utilização do programa PAVIFLEX constitui uma boa alternativa ao MACOPAV quando se pretende prever estruturas de pavimentos flexíveis, até porque além de incorporar metodologias fiáveis, apresenta também vantagens funcionais.

BIBLIOGRAFIA

- Azevedo, M. (1993). *Características Mecânicas de Misturas Betuminosas para Camadas de Base de Pavimentos*. Dissertação de Doutoramento, Universidade Técnica de Lisboa.
- Baptista, A. (1999). *Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Aplicabilidade em Portugal dos métodos Existentes*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra.
- Baptista, A., Picado Santos, L. *Estruturas de Pavimentos Rodoviário Flexível*. Instituto Politécnico de Viseu e Universidade de Coimbra, Coimbra e Viseu.
- Branco, F. et al (2005). *Pavimentos Rodoviários*. Almedina, Coimbra.
- JAE. (1995). *Manual de Concepção de Pavimentos para a Rede Rodoviária Nacional*. JAE (actual E.P.), Almada.
- Lima, H. et al (1999). *Caracterização do Factor Agressividade do Tráfego de Veículos Pesados em Portugal*. JAE e LNEC, Lisboa.
- Pais, J. (1999). *Consideração da Reflexão de Fendas no Dimensionamento de Reforços de Pavimentos Flexíveis*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Minho.
- Picado Santos, L. (1995). *Consideração da Temperatura no Dimensionamento de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Dissertação de doutoramento, Universidade de Coimbra.
- Picado Santos, L. (1998). *Dimensionamento Analítico de Pavimentos Rodoviários Flexíveis*. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Picado Santos, L. (1993). *Método de Dimensionamento da Shell para Pavimentos Rodoviários Flexíveis: Adaptação às Condições Portuguesas*. Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Ribeiro, J. (2008). *Pavimentos 1, Textos didácticos*. FEUP, Porto.
- Ribeiro, J. (2008). *Pavimentos 1, Textos didácticos*. FEUP, Porto.
- <http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/baptista/artigos/Estrada2000.pdf>. 25 de Fevereiro de 2009.
- <http://www.estv.ipv.pt/PaginasPessoais/baptista/artigos/Estrada2002.pdf>. 25 de Fevereiro de 2009.
- http://www.civil.uminho.pt/cec/revista/Num11/Pag_47-58.pdf. 27 de Fevereiro de 2009.
- <http://www.andit.org.br/vjornada/Trabalho%20Final/Trabalho%20V-045.pdf>. 27 de Fevereiro de 2009.
- http://www.dec.fct.unl.pt/UNIC_ENG/palestras/Ciclo_Palestras_2004/palestras_Rocha/PalestraAMB.pdf. 27 de Fevereiro de 2009.