

Universidade do Minho

[CN-09]

Capitão, S.D., Picado-Santos, L.G., **Pais, J.C.**

“Estabelecimento de misturas betuminosas para camadas estruturalmente importantes da formulação analítica à composição final”

Jornadas de Estradas e Pontes dos Países de Língua Portuguesa, Lisboa,
2001

JORNADAS DE ESTRADAS E PONTES DOS PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA
LISBOA, 2001

TEMA 3:
CONSERVAÇÃO E REABILITAÇÃO DE ESTRADAS

ESTABELECIMENTO DE MISTURAS BETUMINOSAS PARA CAMADAS ESTRUTURALMENTE
IMPORTANTES: DA FORMULAÇÃO ANALÍTICA À COMPOSIÇÃO FINAL

SILVINO DIAS CAPITÃO

Engenheiro Civil, MSc, Prof. Adjunto do Departamento de Engenharia Civil do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, tel. +351.239.790.368; fax: +351.239.790.270; e-mail: capitao@dec.isec.pt.

LUÍS DE PICADO-SANTOS

Engenheiro Civil, PhD, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, tel. +351.239.797.143; fax: +351.239.797.146; e-mail: picsan@dec.uc.pt.

JORGE C. PAIS

Engenheiro Civil, PhD, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, tel. +351.253.510.212; fax: +351.239.510.217; e-mail: jpais@netvisao.pt.

RESUMO

A formulação de misturas betuminosas tem como objectivo determinar a combinação de agregados e betume numa mistura, de tal modo que o material obtido apresente características que a façam resistir à acção das cargas e do clima, ao longo de um determinado período. No entanto, é reconhecido que os métodos de formulação de misturas betuminosas geralmente usados, ditos "empíricos", incluindo alguns métodos "por receita", não permitem formular, com a fiabilidade necessária, as misturas betuminosas com o desempenho mecânico desejado. Por essa razão, o esforço de investigação mais recente tem sido dirigido para o estabelecimento de novas metodologias que permitam formular misturas betuminosas a partir de critérios baseados nas propriedades mecânicas "fundamentais" dos materiais.

No presente artigo apresenta-se uma metodologia para o estabelecimento de misturas betuminosas destinadas à construção de camadas de pavimentos com uma função estrutural importante. A referida metodologia incorpora procedimentos que, embora não sendo novos, só têm tido aplicação mais frequente noutros países e há relativamente poucos anos, procurando-se com a sua utilização responder às tendências actuais no que respeita à formulação laboratorial de misturas betuminosas.

Além disso, dá-se conta no artigo de uma aplicação informática, desenvolvida pelos autores para ambiente *Windows*, a qual tem sido utilizada com vantagem na fase da formulação que antecede a realização de ensaios mecânicos em laboratório. Os benefícios da sua utilização derivam do facto de ser possível simular de forma rápida diversas combinações dos materiais disponíveis, o que permite, logo à partida, avaliar, embora de forma aproximada, a aptidão dos materiais disponíveis para o fabrico da mistura betuminosa pretendida. É ainda possível estabelecer as composições de misturas a sujeitar a ensaios mecânicos fundamentais em laboratório com vista ao estabelecimento da mistura final a adoptar em obra.

1. Introdução

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, isto é, 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 no pavimento.

Aquelas propriedades variam com o tipo de estrada, com o tipo de camada do pavimento e até com o método de formulação usado. Por essa razão, um dos caminhos que tem sido seguido consiste em usar misturas betuminosas que diferem entre si consoante o problema em concreto a resolver. Assim, as misturas colocadas nas camadas de pavimentos podem diferir no tipo de material agregado e na sua granulometria, no tipo e na quantidade de ligante, na utilização de aditivos ou agentes que modificam o betume, e na sua composição volumétrica.

Nos últimos anos tem-se verificado um grande esforço de investigação para o estabelecimento de novos métodos que permitam formular misturas betuminosas a partir de critérios baseados nas propriedades

mecânicas dos materiais. Estes métodos são designados por métodos fundamentais ou racionais por se apoiarem na avaliação das propriedades "fundamentais" dos materiais, ou seja, naquelas que interessam aos métodos de dimensionamento mais utilizados, designadamente o módulo de deformabilidade, a resistência à fadiga e a resistência à deformação permanente.

2. Breve Referência aos Métodos de Formulação de Misturas Betuminosas

Não existindo ainda uma uniformização dos procedimentos que têm sido propostos a nível mundial, apresenta-se uma classificação, proposta por Francken *et al.* (1998 [1]), baseada nos processos e nos conceitos envolvidos nas metodologias incluídas em cada uma dos grupos propostos. Todavia, é de referir que os avanços recentes que têm sido apresentados por várias entidades de diferentes países não são ainda aceites de uma forma consensual.

Os métodos de formulação de misturas betuminosas, designadamente os aplicáveis a misturas do tipo betão betuminoso, podem ser classificados nas categorias que se descrevem a seguir ([1], [2]).

Os métodos designados "por receita" estabelecem desde o início a constituição das misturas betuminosas, mas apenas quando estas são tradicionais e há muita experiência na 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 (p.e. o Reino Unido) fazem-no apenas para materiais e composições que provaram ter bom comportamento quando em serviço.

Os métodos empíricos derivam dos métodos "por receita", consistindo na realização de ensaios mecânicos simples e relativamente económicos. 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. Os provetes produzidos em laboratório não reproduzem obrigatoriamente as condições de compactação usadas em obra. Os ensaios mecânicos a que são submetidos os provetes não permitem, em geral, medir as propriedades fundamentais dos materiais. O método de Marshall é um dos que pode ser incluído na classe dos ensaios empíricos.

Os métodos analíticos consistem no cálculo da composição volumétrica de 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 de procedimentos analíticos. Trata-se, pois, de um processo que pode ser automatizado em computador. Um dos métodos analíticos mais conhecidos é o desenvolvido pelo CRR - *Centre de Recherches Routières* da Bélgica (CRR R 61/87, 1987 [3]).

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 compactidade e estimar com uma precisão suficiente o volume de vazios que será obtido *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 compactabilidade 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 mecânicos adicionais para verificar as composições resultantes dos cálculos. Dado o grande número de variáveis envolvidas, é ilusório pensar que é possível obter, com elevada confiança, misturas com bom comportamento mecânico recorrendo apenas aos métodos volumétricos. Por

exemplo, o procedimento de formulação americano SHRP - Superpave nível I (Cominsky, 1994 [4]; Kennedy, 1994 [5]) pode ser classificado na família de métodos volumétricos.

Um número importante de métodos de formulação utilizados na Europa podem ser designados por métodos relacionados com o desempenho mecânico. Podem apontar-se como exemplos os métodos propostos pela Universidade de Nottingham (Bell *et al.*, 1989 [6]; Cooper *et al.*, 1991 [7]), o usado em França (Delorme, 1991 [8]) e o Australiano (ARRB, 1997 [9]), entre outros.

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 mecânicos de simulação e/ou fundamentais, de modo a estimar e/ou medir as propriedades das misturas, as quais estão relacionadas com o comportamento mecânico do pavimento. As composições das misturas são finalmente ajustadas com base nos resultados dos testes mecânicos realizados. Os ensaios de simulação 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 de simulação de tráfego ou *wheel tracking*). Para avaliar o comportamento mecânico das misturas betuminosas são usados, por exemplo, o ensaio de compressão diametral com aplicação de cargas repetidas (BS Draft 213, 1993 [10]) ou o ensaio de fluência com aplicação de cargas repetidas (BS Draft 185, 1994 [11]).

Os métodos baseados no desempenho mecânico das misturas constituem o grupo de métodos que envolve maior complexidade, tratando-se de metodologias ainda pouco divulgadas e generalizadas. Podem classificar-se nesta família os métodos desenvolvidos nos EUA, designadamente os métodos SHRP - Superpave Nível 2 e 3 (Cominsky, 1994 [12]) e o SHRP - A 698 (Sousa *et al.*, 1993 [13]).

Estes métodos consistem em sujeitar a ensaios racionais misturas cujas composições foram obtidas por quaisquer dos métodos acima mencionados (normalmente métodos volumétricos), prevendo-se o seu comportamento ao longo de um certo período através da introdução dos resultados num sistema de avaliação integrado. Os ensaios racionais permitem medir as propriedades fundamentais das misturas, as quais podem ser usadas como dados de entrada em modelos de previsão do comportamento dos pavimentos. A percentagem óptima de betume é fixada com base nas previsões a que se chega por aplicação daqueles modelos numéricos. O comportamento das misturas no campo é estimado através de factores de conversão (*shift factors* na terminologia inglesa) calibrados com base na experiência anterior. Consoante os resultados obtidos da forma indicada, uma mistura pode ser aceite ou rejeitada. Pretende-se com este tipo de métodos fazer-se previsões realistas da evolução dos diferentes tipos de degradações dos pavimentos durante a sua vida. Refira-se que, os estudos entretanto desenvolvidos nos EUA (Witczak *et al.*, 1997 [14]) puseram em causa a validade dos modelos propostos pelo sistema *Superpave*, tendo este sido mesmo abandonado pela administração rodoviária por ter sido considerado irrealizável. Em consequência, recentemente, equipas de investigadores americanos têm vindo a estudar novos métodos de ensaios e novos modelos que possam vir a ser adoptados para a formulação de misturas betuminosas (Leahy *et al.*, 1999 [15]).

3. Metodologia para a Formulação de Misturas Betuminosas

3.1.1. Generalidades

Os requisitos estruturais mínimos a cumprir por uma mistura betuminosa dependem das condições concretas do problema a resolver, designadamente da importância e da localização da estrada, do tipo de pavimento (flexível ou semi-rígido), da espessura da(s) camada(s) do pavimento, da função da(s) camada(s) no pavimento, da acção do tráfego, das acções climáticas, especialmente as relativas à temperatura, entre outros. Uma vez definido o problema, podem obter-se indicações para os materiais a utilizar, estabelecer os ensaios a realizar e as condições para as quais devem ser conduzidos.

O procedimento de formulação que se propõe procura incorporar os princípios e as preocupações assinaladas, designadamente no que respeita à inclusão de ensaios relacionados com o desempenho estrutural. Este tipo de abordagem é o usado pela maioria dos países que implementaram metodologias recentes de formulação de misturas, como por exemplo o Reino Unido, a França, a Austrália e a Holanda, porquanto os métodos que incluem modelos de previsão do comportamento durante a vida, ainda carecem de ser validados e/ou ajustados para poderem ser usados universalmente.

O esquema apresentado na Figura 1 resume as etapas a considerar num processo de formulação, descrevendo-se nos parágrafos seguintes as principais etapas que o constituem.

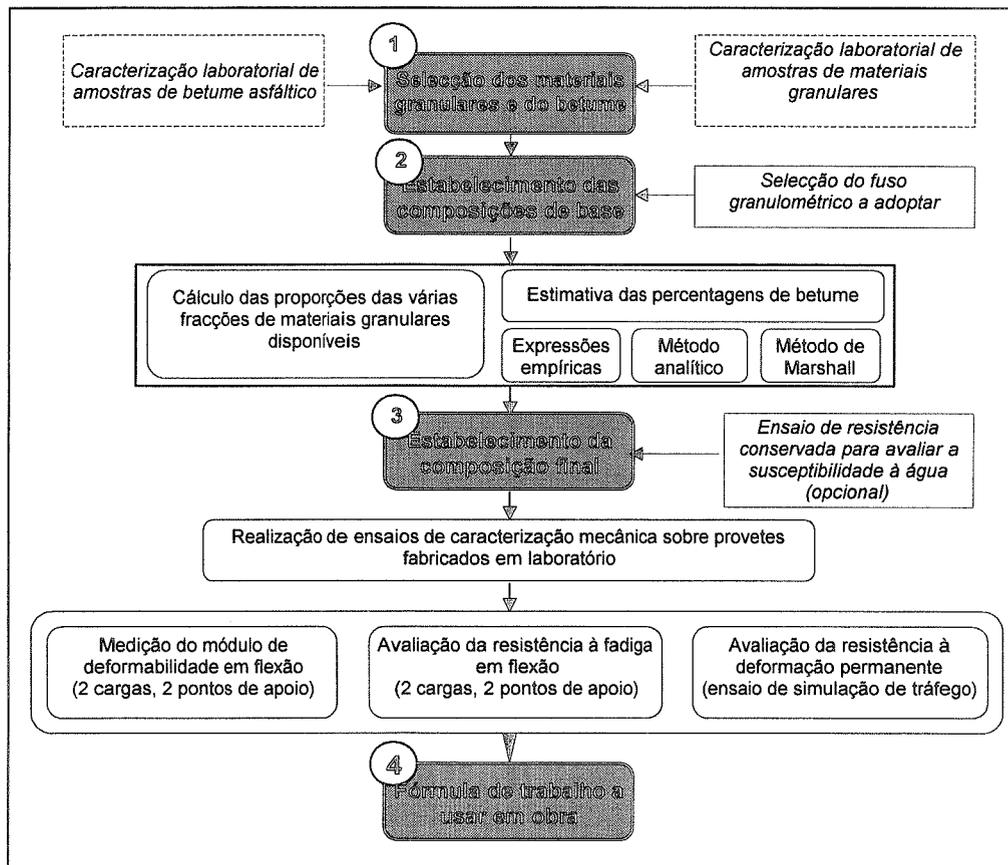


Figura 1 - Esquema do processo de formulação proposto

3.1.2. Seleção dos materiais granulares e do betume

A escolha dos materiais granulares é feita do modo que é habitual seguir-se em Portugal. São estabelecidos, com base na experiência anterior, limites mínimos de qualidade para as características físicas dos agregados. Aqueles limites variam consoante o tipo de mistura betuminosa e de acordo com as funções que a camada a construir vai desempenhar no pavimento. Assim, as especificações impõem requisitos mínimos no que respeita a diversas propriedades, tais como a granulometria, a limpeza, a resistência mecânica ao desgaste e/ou ao polimento, a adesividade ao betume, a forma, a aspereza superficial e a angularidade das partículas mais grossas, entre outras.

Quando os materiais granulares disponíveis não cumprem integralmente as especificações, no que respeita à granulometria, à forma e à resistência ao desgaste, aqueles podem ainda ser aceites, uma vez que a utilização de agregados de qualidade inferior ao especificado envolve geralmente um risco estrutural relativamente pequeno, porquanto a selecção final da mistura não é feita simplesmente com base nos critérios avaliados nesta fase.

O betume asfáltico é escolhido de acordo com os princípios que são geralmente usados em Portugal. O material é submetido a ensaios relativamente simples, os quais permitem medir algumas propriedades ditas "empíricas", tais como as indicadas na Especificação LNEC E-80 de 1997 [16], destacando-se a penetração a 25 °C e a temperatura de amolecimento pelo método do anel e bola.

No caso de o betume não cumprir as exigências estabelecidas pode rejeitar-se ou aceitar-se consoante a importância relativa que seja atribuída à desconformidade com a especificação aplicável, face às condições particulares a que o betume vai ficar sujeito quando em serviço. De qualquer modo, embora o betume contribua de forma significativa para o comportamento da mistura final, a adopção de um betume que apresente alguns desvios face às especificações poderá aceitar-se, uma vez que a mistura final, tal como se evidenciou para os agregados, não é seleccionada apenas com base nas propriedades do betume.

3.1.3. Estabelecimento das composições de base a sujeitar a ensaios mecânicos

Os métodos de formulação existentes, mesmo quando incluem a realização de ensaios mecânicos racionais, começam por estabelecer várias misturas alternativas, as quais são normalmente propostas com base em critérios de natureza volumétrica.

Propõe-se uma metodologia próxima da descrita, embora incorporando também aquilo que é habitual seguir-se em Portugal. As misturas de agregados são estabelecidas a partir de um fuso granulométrico pré-estabelecido, o qual limita superior e inferiormente o traçado das curvas granulométricas que resultam da combinação das várias classes de agregados disponíveis. A banda granulométrica geralmente proposta para cada tipo de mistura é já o resultado da aplicação, com base na experiência anterior, de critérios volumétricos e/ou de trabalhabilidade da mesma. Para misturas de agregados de granulometria contínua, é habitual adoptarem-se fusos definindo leis que seguem a chamada expressão de *Talbot*, a qual tem a seguinte forma:

$$P_i = 100 \times \left(\frac{d_i}{D_{\max}} \right)^n \quad (3.1)$$

onde,

P_i - percentagem de material que passa no peneiro de malha d_i ;

d_i - dimensão da malha do peneiro i , escolhido entre as dimensões 0 e D_{\max} ;

D_{\max} - dimensão máxima do agregado;

n - expoente que traduz o andamento da curva granulométrica (consoante o tipo de mistura, mais fina ou mais grossa, toma valores entre 0,4 e 0,7, sendo os valores próximos de 0,5 os que conduzem a misturas com menor quantidade de vazios).

Uma vez fixadas as misturas de agregados a testar, procede-se à determinação das quantidades de betume a adoptar no fabrico de misturas de base a sujeitar a ensaios mecânicos racionais. O método que se propõe consiste na utilização de expressões e/ou procedimentos analíticos, como por exemplo a expressão baseada na superfície específica usada em França ou o método analítico proposto pelo CRR da Bélgica [3].

A expressão empírica francesa (3.2) permite estimar o teor em betume (massa de betume em relação à massa de agregado seco) a usar no fabrico de misturas betuminosas:

$$t_b = K \cdot \alpha \cdot \sqrt[5]{\Sigma} \quad (3.2)$$

onde:

K - módulo de riqueza (tradução do termo francês *module de richesse*);

$$\alpha = \frac{2,65}{\rho_a} \quad (3.3)$$

ρ_a - massa volúmica da mistura de agregados, em g/cm^3 ;

Σ - superfície específica do agregado, em m^2/kg ;

$$\Sigma = 0,25 G + 2,3 S + 12 s + 135 f \quad (3.4)$$

sendo:

G - percentagem de agregado de dimensão superior a 6,3 mm;

S - percentagem de agregado de dimensão compreendida entre 6,3 mm e 0,315 mm;

s - percentagem de agregado de dimensão compreendida entre 0,315 mm e 0,08 mm;

f - percentagem de agregado de dimensão inferior a 0,08 mm.

O método do CRR, uma vez implementado em computador, pode constituir uma solução mais prática que o uso da expressão empírica indicada. De facto, com a aplicação daquele método é mais fácil a simulação de várias composições volumétricas diferentes, intervindo, por exemplo, ao nível da percentagem de vazios a atingir na mistura depois de compactada e, assim, estimar com maior aproximação as percentagens de betume a testar.

Nas Figuras 2 e 3 mostram-se duas janelas do programa desenvolvido pelos autores, as quais correspondem ao cálculo automático das proporções dos vários conjuntos granulares disponíveis e à formulação analítica usando o procedimento do CRR.

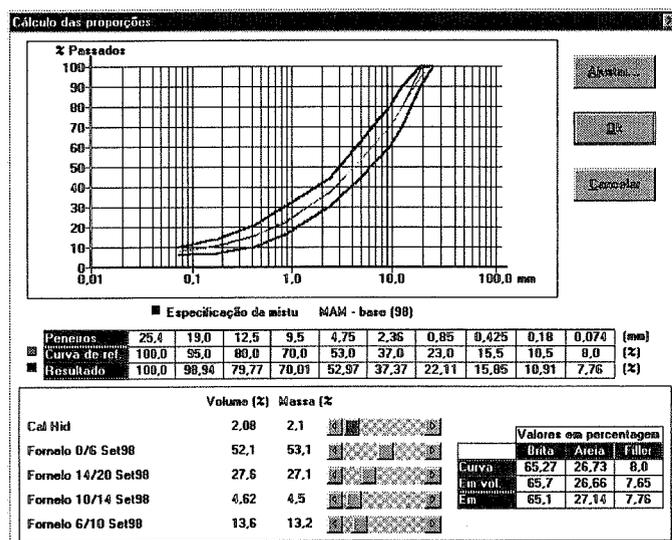


Figura 2 – Janela do cálculo da composição da mistura de agregados

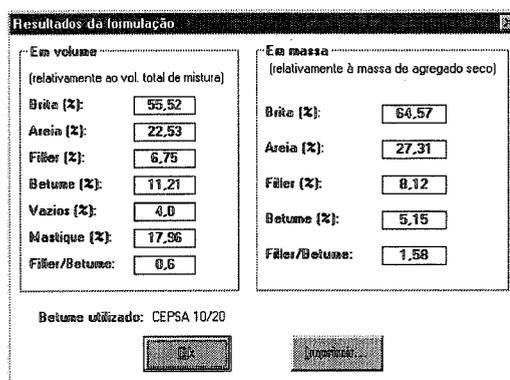


Figura 3 – Janela da formulação analítica da mistura betuminosa

Em alternativa, pode estimar-se a quantidade de betume pelo método de Marshall, através do procedimento habitual. Tratando-se de um caminho mais moroso que a utilização das expressões empíricas ou do modelo analítico referidos, a utilização do método de Marshall tem a vantagem de proporcionar indicações bastante conhecidas no meio técnico. Porém, uma vez que a escolha final da mistura se faz com base em resultados de ensaios diferentes dos incluídos naquele método, é preferível utilizar as metodologias menos trabalhosas nesta fase.

As misturas de base a sujeitar a ensaios de caracterização mecânica são as que resultam das curvas granulométricas definidas como se indicou, produzidas com as percentagens de betume que se aproximem das obtidas pelas estimativas realizadas. Em geral, aquelas estimativas não diferem muito entre si, pelo que será adequado testar duas ou três percentagens de betume, numa gama de $\pm 0,5$ % em torno do valor médio obtido.

3.1.4. Estabelecimento da composição final - Produção de provetes

Para estabelecer a composição final a aplicar em obra, é necessário produzir misturas e provetes em laboratório que representem tão bem quanto possível as condições construtivas do campo. Em laboratório, o betume é aquecido a uma temperatura para a qual aquele atinge uma viscosidade da ordem de 0,2 Pa.s, considerada adequada para a realização das operações de mistura. Uma vez atingida a temperatura de mistura dos materiais e efectuado o doseamento ponderal dos materiais aquecidos, estes são misturados mecanicamente.

Quando se produzem provetes de misturas betuminosas em laboratório, interessa utilizar um processo de compactação que reproduza tão bem quanto possível as condições de obra, designadamente em termos de propriedades volumétricas e de características mecânicas dos materiais. Tem-se verificado

que os métodos de compactação geralmente considerados como mais adequados para a moldagem de provetes em laboratório, com vista à sua caracterização mecânica, são os que utilizam princípios de compactação semelhantes aos cilindros de obra. Assim, após um período de condicionamento térmico das amassaduras à temperatura adequada ao tipo de betume utilizado, compacta-se o material, com um cilindro de rolos em modo de vibração, num molde metálico com as dimensões adequadas à produção de lajetas. Estas devem ser moldadas nas espessuras desejadas, sendo os provetes obtidos por serragem posterior das mesmas.

- Caracterização mecânica em laboratório

Os módulos de deformabilidade e a avaliação da resistência à fadiga das misturas betuminosas devem ser obtidos em ensaios de flexão, com aplicação de cargas repetidas, conduzidos sobre provetes prismáticos (vigas). Seguindo a experiência dos autores, corroborada por outros (Pais *et al.*, 2000 [17]), propõe-se a realização de ensaios de flexão de vigas, simplesmente apoiadas, com carregamentos aplicados nos terços do vão e com extensão controlada. Por exemplo, para agregados de dimensão máxima de 25 mm devem ser usadas vigas com 10 cm de lado. De referir que a aplicação informática a que se fez referência também permite fazer previsões do módulo de deformabilidade e da resistência à fadiga da mistura estabelecida analiticamente, o que poderá dar algumas indicações sobre os comportamentos a esperar na avaliação laboratorial.

A determinação dos módulos deve fazer-se através de varrimentos de frequências sinusoidais (10, 5, 1 Hz), para extensões tão baixas quanto possível, não devendo ultrapassar-se o valor de 100×10^{-6} . Procura-se, assim, obter propriedades na região de comportamento linear do material. A temperatura de ensaio deve ter um valor representativo do valor de cálculo (temperatura equivalente) obtido para a região geográfica em questão, sugerindo-se a utilização do procedimento proposto por Picado-Santos (1994 [18]) para a sua determinação. Deverão ser ensaiados, pelo menos, quatro provetes por cada mistura sujeita a ensaio. Não existindo indicações mais precisas, deve tomar-se como valor de referência a atingir pelo módulo de deformabilidade o valor considerado no dimensionamento da camada que se pretende construir.

A avaliação do comportamento à fadiga consiste em levar os provetes à ruína (redução de 50% do seu módulo de deformabilidade inicial), de modo a poder relacionar o nível de extensão aplicado com o número de ciclos até à ruína do material. Em geral, para obter uma lei de fadiga em laboratório utilizam-se, pelo menos, três níveis de extensão: um alto (da ordem de 800×10^{-6}), um intermédio (da ordem de 300×10^{-6}) e um baixo (da ordem de 100×10^{-6}), não sendo aconselhável ensaiar menos de três provetes para cada nível. Por simplicidade, deve usar-se um carregamento sinusoidal com uma frequência fixa de 10 Hz, e os ensaios devem ser conduzidos à mesma temperatura a que é determinado o módulo de deformabilidade.

Para avaliar a resistência das misturas à deformação permanente, propõe-se a realização de ensaios de simulação de tráfego, os quais consistem em medir a evolução da deformação de uma lajeta totalmente apoiada, sujeita à sucessiva passagem de uma roda, animada de um movimento de vai-vem, a qual aplica uma certa pressão sobre o material, em condições de temperatura elevada (em regra 60 °C). Para isso, tem sido usado no nosso país um equipamento deste tipo proveniente de Espanha, o qual permite ensaiar provetes com $30 \times 30 \times 5$ cm³. Os critérios de aceitação/rejeição das misturas, embora estabelecidos para condições espanholas, poderão ser adoptados em Portugal. Aqueles critérios fixam limites para a velocidade de deformação da lajeta em função das condições de solicitação de tráfego e de temperatura do local. As condições mais gravosas exigem que a mistura a seleccionar tenha uma velocidade de deformação máxima de 15×10^{-3} mm/min. Este ensaio encontra-se normalizado pela norma espanhola NLT-173/84 [19]. Porém, sugere-se a utilização de provetes compactados nas mesmas condições que os utilizados nos ensaios de flexão, de modo a ensaiar provetes com características mais próximas das do campo.

Como complemento, para avaliar a susceptibilidade à água das misturas produzidas, decorrente, por exemplo, de falta de adesividade entre o agregado e o ligante, podem realizar-se ensaios de resistência conservada, após imersão em água de provetes do tipo Marshall (ASTM D 1075, 1996 [20]).

4. Conclusões

Após uma pequena resenha inicial relativa às famílias de métodos de formulação existentes, mencionaram-se os princípios aos quais os procedimentos de formulação mais actuais devem responder.

Apresentou-se uma metodologia que permite formular misturas betuminosas com maior fiabilidade que a proporcionado pelos métodos empíricos, às quais se exige um importante desempenho estrutural. Pretende-se, por um lado, que a metodologia descrita não implique grande morosidade e, por outro lado, possibilite uma caracterização mecânica razoável dos materiais, com o objectivo de melhorar a probabilidade de sucesso do material formulado, em especial quando é exigido um excepcionalmente bom desempenho estrutural da mistura betuminosa.

Deu-se conta de uma aplicação informática desenvolvida pelos autores que tem sido usada com sucesso na formulação analítica de misturas betuminosas, a qual permite simular rapidamente várias soluções, tanto em termos de composição de agregados como em relação à mistura betuminosa. Além disso, dá ainda a possibilidade de estimar o módulo de deformabilidade e a resistência à fadiga através da aplicação das expressões de previsão da Shell e da Universidade de Nottingham.

Descreeveram-se de forma sucinta os modos operatórios relativos ao fabrico e compactação das misturas, à produção de provetes e à caracterização mecânica laboratorial.

5. Referências Bibliográficas

1. FRANCKEN, L. ET AL., "Bituminous binders and mixes: state of the art and interlaboratory tests on mechanical behaviour and mix design", RILEM Report 17, London, 1998.
2. LUMINARI, M., "Mix design: State-of-the-art and RILEM interlaboratory test program, Mechanical Tests for Bituminous Materials", RILEM, Lyon, 1997, pp 27-38.
3. CENTRE DE RECHERCHES ROUTIÈRES, "Code de bonne pratique pour la formulation des enrobés bitumineux denses", Recommandations C.R.R. - R 61/87, C.R.R., Bruxelles, 1987.
4. COMINSKY, R., "SHRP-A-408: Level one mix design: materials selection, compaction and Conditioning", National Research Council, Washington, DC, 1994.
5. KENNEDY, T., "SHRP-A-410: Superior performing asphalt pavements (Superpave): The product of the SHRP asphalt research program", National Research Council, Washington, DC, 1994.
6. BELL, C. ET AL., "Development of a new procedure for bituminous mix design", Proceedings of the 4th Eurobitume Symposium, Madrid, 1989.
7. COOPER, K. ET AL., "Development of a practical method for the design of hot mix asphalt", Annual Meeting, Transport Research Board, Washington, DC, 1991.
8. DELORME, J., "Méthode française de formulation des enrobés", Revue Générale des Routes et des Aéroports, 1991.
9. AUSTRALIAN ROAD RESEARCH BOARD TRANSPORT RESEARCH, "Selection and design of asphalt mixes: Australian provisional guide", APRG Report N° 18, Australian Road Research Board Transport Research, s.l., 1997.
10. BRITISH STANDARD INSTITUTION, "Method of determination of the indirect tensile stiffness modulus of bituminous materials", Draft for Development 213, BSI, Londres, 1993.
11. BRITISH STANDARD INSTITUTION, "Methods for assessment of resistance to permanent deformation of bitumen aggregate mixtures subject to unconfined uniaxial loading", Draft for Development 185, BSI, Londres, 1994.
12. COMINSKY, R., "SHRP-A-407: The Superpave mix design manual for new construction and overlays", National Research Council, Washington, DC, 1994.
13. SOUSA, J. ET AL., "New developments in fatigue and permanent deformation of asphalt-aggregate mixes from de SHRP A-003A team", Proceedings of the Conference Strategic Highway Research Program and Traffic Safety on Two Continents, Haia, 1993.
14. WITCZAK, M., VON QUINTUS, H., SCHWARTZ, C., "Superpave support and performance models management: evaluation of the SHRP performance models system", 8th International Conference on Asphalt Pavements, Seattle, pp. 175-195, 1997.
15. LEAHY, R., MCGENNIS, R., "Asphalt mixes: materials, design and characterization", Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 68A, 1999, pp 70-127.
16. LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, "Betumes de Pavimentação: Classificação, propriedades e exigências de conformidade", Especificação LNEC E 80, LNEC, Lisboa, 1997.
17. PAIS, J., PEREIRA, P., AZEVEDO, M., "Ensaio mecânicos para caracterização de misturas betuminosas", 1º Congresso Rodoviário Português – Estrada 2000", Lisboa, 2000, pp. 639-649.
18. PICADO-SANTOS, L., "Consideração da temperatura no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis", Dissertação submetida à F.C.T. da Universidade de Coimbra para obtenção do grau de Doutor em Eng.ª Civil, Coimbra, 1994.
19. Especificação Espanhola NLT-173/84, "Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo de laboratorio", Madrid, 1984.
20. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM D 1075-96, "Standard test method for effect of water on compressive strength of compacted bituminous mixtures", Annual Book of ASTM Standards, Section 4: Construction, Vol. 04.3, Road and Paving Materials; Vehicle-Pavement Systems, ASTM, West Conshohocken, 1996