

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento Temático

O desenvolvimento económico e social de um país depende, entre outros factores, da mobilidade de pessoas e bens. No caso de Portugal, a rede rodoviária assume um papel fundamental, dado que os transportes rodoviários são o principal meio de transporte utilizado.

A rede rodoviária portuguesa, constituída na sua maioria por pavimentos flexíveis, tem aumentado a sua extensão, principalmente, desde 1985. Actualmente, a par da construção de novas estradas, previstas no novo plano rodoviário nacional (PRN2000), surge a necessidade da sua reabilitação dado grande parte desta já se aproximar do final do respectivo período de vida.

Ao nível das solicitações do tráfego tem-se registado um aumento do volume e agressividade, ao mesmo tempo que é exigida uma maior qualidade dos pavimentos, no que diz respeito à segurança e comodidade. Deste modo, o aperfeiçoamento dos métodos de dimensionamento de pavimentos e a melhoria do comportamento das misturas betuminosas são fundamentais.

Com o aumento das solicitações e das exigências de qualidade dos pavimentos verifica-se que a espessura total das camadas betuminosas num pavimento tem vindo a aumentar. Este aumento tem limitado, frequentemente, as degradações associadas ao fendilhamento por fadiga com origem na base das camadas betuminosas e às deformações permanentes causadas por deformação da fundação.

Embora se minimize o aparecimento de degradações associadas aos principais mecanismos de ruína do pavimento, não se consegue impedir a ocorrência de deformações permanentes e de fendilhamento com origem na superfície (originados por esforços de tracção e de corte), nem a desagregação da camada superficial do pavimento. Na rede rodoviária nacional pode observar-se uma evolução significativa deste tipo de degradações dos pavimentos flexíveis. Este facto pode ser originado, em parte, por um comportamento inadequado das misturas betuminosas. Assim, é fundamental que se continue a estudar o comportamento das misturas

betuminosas em serviço, para se adequar a sua composição e comportamento às novas exigências dum tráfego cada vez mais agressivo.

Para garantir um comportamento adequado das misturas betuminosas é necessário caracterizar inicialmente os seus componentes (agregados, filer e ligante betuminoso), cujas propriedades devem respeitar os valores indicados em especificações. Porém, o comportamento das misturas betuminosas depende, essencialmente, da sua composição, que é estudada, recorrendo à utilização dos métodos de formulação. O objectivo desses métodos é definir a composição das misturas betuminosas para garantir a obtenção de propriedades mínimas especificadas em função de determinados critérios de ruína.

O método de Marshall continua a ser o mais utilizado para o estudo da composição das misturas betuminosas. Contudo, os métodos de formulação mais recentes baseiam-se na utilização de ensaios mecânicos que permitem determinar as propriedades da mistura betuminosa relacionadas com o respectivo comportamento *in situ*. Assim, é possível estudar a composição, de modo a garantir determinado comportamento da mistura betuminosa em serviço. As propriedades exigidas às misturas betuminosas são várias, nomeadamente:

- resistência às deformações permanentes;
- resistência ao fendilhamento por fadiga;
- módulo de rigidez e ângulo de fase.

Nos métodos de formulação baseados no desempenho das misturas betuminosas, as propriedades avaliadas para caracterização das misturas betuminosas são a resistência à fadiga e a resistência às deformações permanentes. No entanto, outras características das misturas betuminosas também influenciam o seu comportamento em serviço, como a ligação agregado-mastique, que será avaliada de forma pormenorizada neste trabalho.

A perda de ligação entre os agregados e o mastique origina a desagregação das misturas betuminosas e, além disso, causa uma diminuição da rigidez e da resistência à fadiga e às deformações permanentes (Scholz, 1995).

A ligação agregado-mastique é uma característica complexa relacionada com a capacidade do mastique se ligar aos agregados, e manter-se ligado a estes em diversas condições de serviço (por exemplo, na presença de água). A ligação agregado-mastique depende de vários factores, sendo a natureza dos agregados o mais importante. No entanto, os principais factores que

influenciam a ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas em serviço são o envelhecimento e a presença de água.

Os ensaios existentes para estudo da ligação agregado-mastique, habitualmente denominados de ensaios de sensibilidade à água, apenas caracterizam a capacidade de conservação da ligação agregado-mastique das misturas betuminosas sob condições climáticas adversas, especialmente na presença de água. Esses ensaios não conseguem avaliar mecanicamente a ligação agregado-mastique, nem permitem observar a zona onde ocorre a rotura dessa ligação. Para resolver essas limitações, no presente trabalho implementaram-se ensaios mecânicos para estudar a ligação agregado-mastique das misturas betuminosas, o que permitiu obter a sua resistência à tracção e ao corte.

Para preparação dos provetes a utilizar nos ensaios mecânicos efectuados para avaliação da ligação agregado-mastique, definiu-se o mastique betuminoso como sendo o material que envolve e adere aos agregados grossos numa mistura betuminosa. De acordo com o *Texas Department of Transportation* (2004), considerou-se que os agregados grossos teriam uma dimensão superior a 2 mm, enquanto que os agregados mais finos, juntamente com o betume, formariam o mastique betuminoso.

Com base nas conclusões de Curtis et al. (1993), a perda de ligação entre os agregados e o mastique pode ocorrer devido a uma falha de coesão interna do mastique (reduzida resistência do mastique). Assim, uma caracterização completa do mastique betuminoso, não só física mas sobretudo mecânica, foi considerada fundamental.

Como o mastique influencia o comportamento da ligação agregado-mastique, certamente influenciará outras propriedades das misturas betuminosas, o que justifica a importância do estudo efectuado sobre o comportamento das misturas betuminosas e sobre o modo como este é influenciado pelo mastique e pela ligação agregado-mastique. Desai (2001) também refere que o comportamento das misturas betuminosas depende directamente do comportamento dos seus componentes, nomeadamente o mastique betuminoso e a ligação agregado-mastique.

Neste trabalho, o comportamento do mastique, da ligação agregado-mastique e das misturas betuminosas foram avaliados para diferentes composições e para diversas configurações de ensaio, permitindo avaliar a influência do mastique e da ligação agregado-mastique no desempenho das misturas betuminosas.

O conhecimento das propriedades fundamentais do masticue e da ligação agregado-masticue, como componentes duma mistura betuminosa, permitiu desenvolver um modelo de elementos finitos microestrutural e heterogéneo, que pode ser calibrado por comparação com os resultados experimentais. Este modelo permitirá prever o comportamento de misturas betuminosas com diferentes composições, quando submetidas a diversos tipos de carregamento que simulem as condições de serviço.

A modelação do comportamento do masticue e das misturas betuminosas ainda se encontra em desenvolvimento, embora já tenha evoluído até uma análise não linear elástica com fendilhamento que permitiu observar a distribuição de tensões e extensões nas misturas betuminosas e no masticue, assim como o seu fendilhamento. Futuramente, para análise estrutural dum pavimento, estes modelos poderão ser utilizados em locais críticos onde se queira avaliar determinados modos de degradação do pavimento.

1.2. Objectivos e Fases do Trabalho

O presente trabalho pretendeu contribuir para o aprofundamento dos conhecimentos sobre o comportamento das misturas betuminosas através da caracterização dos seus componentes, nomeadamente o masticue betuminoso e a ligação agregado-masticue, com os seguintes objectivos fundamentais:

- determinar experimentalmente as propriedades essenciais do masticue e da ligação agregado-masticue;
- analisar a influência que os parâmetros de composição e as condições de ensaio têm no comportamento do masticue e da ligação agregado-masticue;
- estudar a influência que o masticue e a ligação agregado-masticue têm no comportamento das misturas betuminosas;
- possibilitar o desenvolvimento de um modelo microestrutural e heterogéneo de elementos finitos, baseado nas propriedades essenciais do masticue e da ligação agregado-masticue, para previsão do comportamento das misturas betuminosas.

Para atingir os objectivos deste trabalho, inicialmente foi necessário sintetizar e analisar os conhecimentos existentes sobre o comportamento das misturas betuminosas, sobre o masticue, sobre a ligação agregado-masticue e sobre os modelos de previsão do

comportamento das misturas betuminosas. Em seguida, desenvolveram-se os seguintes estudos de investigação aplicada:

- determinação da composição do masticue betuminoso;
- caracterização mecânica do masticue e da ligação agregado-masticue recorrendo a ensaios especialmente desenvolvidos neste trabalho;
- caracterização mecânica de misturas betuminosas produzidas com diferentes masticues recorrendo a ensaios especialmente desenvolvidos neste trabalho e a ensaios normalizados;
- desenvolvimento de um modelo microestrutural e heterogéneo para previsão do comportamento das misturas betuminosas.

1.3. Conteúdo da Tese

Em seguida descreve-se a organização do trabalho, que se encontra dividido em oito capítulos, tendo em vista a concretização dos objectivos propostos.

Neste primeiro capítulo refere-se a influência do comportamento das misturas betuminosas, e em especial do masticue e da ligação agregado-masticue, na limitação da ocorrência de degradações nos pavimentos, ou na minimização da sua evolução, indicando-se ainda os principais objectivos deste trabalho e a respectiva organização.

O segundo capítulo descreve a constituição, o comportamento e as degradações dos pavimentos rodoviários flexíveis e indica a influência das misturas betuminosas no desempenho dos pavimentos rodoviários flexíveis. Também se refere a composição das misturas betuminosas e a caracterização dos seus componentes (agregados e ligante betuminoso), assim como os métodos de formulação, aos quais se pode recorrer para estudar a composição das misturas betuminosas. Em seguida, relacionam-se os estados de tensão instalados num pavimento com os ensaios mecânicos utilizados para avaliar o comportamento das misturas betuminosas e descrevem-se as principais características mecânicas das misturas betuminosas, ou seja, o módulo de rigidez, a resistência à fadiga e a resistência às deformações permanentes. Por último, indicam-se os principais factores que influenciam o comportamento das misturas betuminosas.

No terceiro capítulo sintetizam-se os conhecimentos existentes sobre o masticue e sobre a ligação agregado-masticue das misturas betuminosas. A influência que a presença de água e o

envelhecimento do betume têm na ligação agregado-mastique justifica a sua análise e a descrição dos ensaios que permitem estudar esses fenómenos. Finalmente, indicam-se os principais aditivos utilizados para retardar a perda de ligação agregado-mastique das misturas betuminosas em serviço.

No Capítulo 4 começa-se por definir as misturas betuminosas a estudar, caracterizam-se os agregados e o betume utilizados neste trabalho. A fase seguinte do trabalho consiste na análise da composição do mastique existente nas misturas betuminosas, tendo sido desenvolvido um procedimento experimental para efectuar essa análise. Finalmente, desenvolve-se uma metodologia para caracterizar o comportamento mecânico do mastique betuminoso e avalia-se a influência dos parâmetros de composição e ensaio nesse comportamento.

No Capítulo 5 estuda-se a ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas, definindo-se inicialmente o tipo de carregamento e as dimensões dos provetes a utilizar nos ensaios mecânicos, e indicando-se as várias configurações de ensaio utilizadas. Seguidamente, determina-se a influência da composição das misturas betuminosas na ligação agregado-mastique, analisando-se também o tipo de rotura de ligação entre o mastique e os agregados (falha coesiva no mastique ou falha interfacial na ligação agregado-mastique).

No sexto capítulo avalia-se o comportamento mecânico de misturas betuminosas produzidas com os mastiques estudados neste trabalho. Desta forma, procura avaliar-se a influência do mastique betuminoso no comportamento das misturas betuminosas. Além disso, pretende validar-se os ensaios utilizados na caracterização do mastique e da ligação agregado-mastique por comparação com os ensaios normalizados realizados sobre as misturas betuminosas.

No Capítulo 7 sintetizam-se os principais trabalhos sobre modelos de previsão do comportamento das misturas betuminosas. Em seguida, desenvolveu-se um modelo microestrutural e heterogéneo para previsão do comportamento das misturas betuminosas, baseado nas características do mastique e da ligação agregado-mastique, que foi utilizado, essencialmente, para estudar a distribuição de tensões e extensões e o fendilhamento nas misturas betuminosas.

No último capítulo referem-se as conclusões mais relevantes do trabalho desenvolvido e as linhas futuras de investigação a desenvolver com base nas principais conclusões do trabalho.

CAPÍTULO 2

COMPORTAMENTO DAS MISTURAS BETUMINOSAS

2.1. Introdução

Nas últimas décadas tem-se reconhecido a necessidade de melhorar o desempenho estrutural dos pavimentos rodoviários flexíveis, para que estes possam suportar um tráfego cada vez mais agressivo, no que diz respeito ao aumento das cargas por eixo e à configuração de eixos e rodas. O aumento da velocidade de circulação e a necessidade de maior segurança e comodidade por parte dos utentes também exigiram uma maior qualidade funcional do pavimento.

Para melhorar o desempenho estrutural e a qualidade funcional dos pavimentos é necessário estudar a sua constituição e comportamento em relação aos principais mecanismos de ruína, de modo a evitar a ocorrência de degradações prematuras que comprometem a sua integridade. Na Secção 2.2 deste trabalho, faz-se uma apresentação sucinta sobre esses assuntos.

Com o aumento das solicitações e das exigências de qualidade dos pavimentos verifica-se que a espessura total das camadas betuminosas dos pavimentos é cada vez maior, o que tem limitado, em muitos casos, as degradações do pavimento. Contudo, embora se aumente a rigidez dos pavimentos, isto não implica, necessariamente, uma diminuição das tensões que actuam nas misturas betuminosas situadas nas camadas superiores do pavimento. Assim, é necessário atender sobretudo ao comportamento das misturas betuminosas utilizadas nessas camadas, o que justifica a realização deste trabalho.

Uma das exigências fundamentais para se garantir um comportamento adequado das misturas betuminosas consiste na caracterização dos seus componentes (agregados e ligante betuminoso), os quais devem possuir características apropriadas às condições particulares a que as misturas betuminosas serão submetidas.

O comportamento das misturas betuminosas depende da sua composição, que pode ser estudada, recorrendo à utilização dos métodos de formulação de misturas betuminosas. Esses

métodos têm por objectivo obter as proporções volumétricas de cada componente da mistura betuminosa (curva granulométrica dos agregados, teor em betume, aditivos e nível de compactação), que permitem obter o comportamento desejado para a mistura betuminosa.

Na Secção 2.3 deste trabalho, descreve-se a composição das misturas betuminosas, indica-se o procedimento de caracterização dos materiais que a compõe e faz-se uma breve referência à evolução dos métodos de formulação, seguida duma descrição das diferentes categorias em que estes se inserem e duma indicação das vantagens e desvantagens de cada categoria de métodos de formulação. Por ser o método de formulação mais aplicado em Portugal, apresenta-se pormenorizadamente o método de formulação baseado no ensaio de Marshall.

Os métodos de formulação mais recentes baseiam-se na utilização de ensaios mecânicos que simulam determinado comportamento da mistura betuminosa *in situ*. Assim, é possível estudar a composição para otimizar determinadas características de comportamento requeridas às misturas betuminosas em serviço, das quais se destacam as seguintes:

- resistirem às deformações permanentes;
- resistirem ao fendilhamento por fadiga e ao fendilhamento térmico;
- terem uma adequada adesividade agregado-mastique que impeça a sua desagregação;
- serem trabalháveis durante a sua produção, espalhamento e compactação;
- serem duráveis, para resistirem ao desgaste do tráfego e aos efeitos do ar e da água;
- serem impermeáveis, para protegerem as camadas inferiores da água da chuva;
- possuírem uma adequada textura superficial;
- causarem um nível de ruído pneu/pavimento reduzido;
- terem boas características ópticas;
- possibilitarem a obtenção duma superfície regular;
- terem uma manutenção fácil;
- serem de utilização economicamente vantajosa.

Na Secção 2.4, indica-se a influência do comportamento das misturas betuminosas no desempenho dos pavimentos rodoviários flexíveis, com o objectivo de compreender em que medida este trabalho, dirigido essencialmente ao estudo das misturas betuminosas, pode contribuir para uma melhoria efectiva do comportamento dos pavimentos.

Se os ensaios utilizados para formulação das misturas betuminosas forem representativos do seu comportamento *in situ*, estes conseguem garantir que determinada característica, avaliada nesses ensaios, não vai comprometer o funcionamento do pavimento durante o seu período de vida.

Durante a formulação deve analisar-se as condições específicas às quais a mistura betuminosa vai ser submetida no pavimento (estado de tensão, temperaturas, modos de carregamento, entre outras), para definir as principais características a exigir à mistura betuminosa. Na Secção 2.5, referem-se os estados de tensão e deformação instalados num pavimento, dado que os ensaios mecânicos utilizados em laboratório, para avaliar o comportamento das misturas betuminosas, recorrem a estes valores para simularem adequadamente o comportamento das misturas betuminosas *in situ*.

O principal objectivo deste trabalho consiste em avaliar o modo como o mastique e a ligação agregado-mastique contribuem para o comportamento mecânico das misturas betuminosas. Assim, nas Secções 2.6, 2.7 e 2.8 descrevem-se as principais características de comportamento requeridas às misturas betuminosas, ou seja, o módulo de rigidez, a resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência às deformações permanentes. Além disso, são descritos alguns dos ensaios utilizados para caracterizar estas propriedades das misturas betuminosas.

Finalmente, na Secção 2.9, refere-se a forma como os factores relativos às condições de ensaio e à composição das misturas betuminosas influenciam o comportamento das misturas betuminosas, nomeadamente, o módulo de rigidez e a resistência à fadiga e às deformações permanentes.

2.2. Constituição e Comportamento dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis

A maior parte da extensão da rede rodoviária portuguesa é formada por pavimentos flexíveis, cuja constituição básica é a seguinte (Figura 2.1):

- um conjunto de camadas superiores compostas por misturas betuminosas;
- um conjunto de camadas inferiores formadas por materiais granulares, assentes numa camada de fundação.

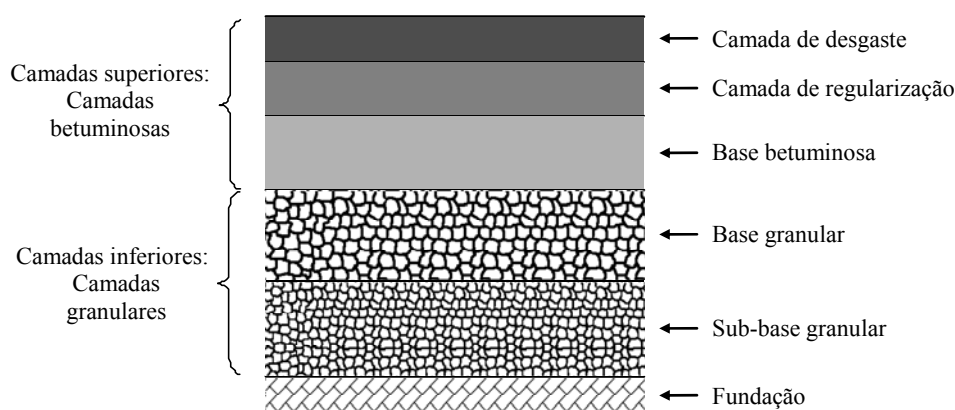


Figura 2.1 – Constituição tipo dum pavimento rodoviário flexível

As camadas superiores dos pavimentos, realizadas com misturas betuminosas, podem ser formadas por: uma camada de desgaste, uma camada de regularização e uma camada de base.

As camadas inferiores, realizadas com materiais granulares não ligados (estabilizados mecanicamente), podem ser formadas por: uma base granular e uma sub-base granular. No entanto, não é habitual a coexistência das bases betuminosas e granulares.

A camada de desgaste tem a função de resistir à acção directa do tráfego e do clima e assume todas as funções funcionais. Além de proteger as camadas inferiores das acções climáticas, contribui para a resistência global da estrutura. A camada de regularização forma uma superfície mais regular (onde assentará a camada de desgaste), e também contribui para a resistência global da estrutura. A base betuminosa tem, essencialmente, uma função estrutural.

A camada de base granular tem 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 de obra, ao reduzir as tensões no solo de fundação e ao homogeneizar as características mecânicas da superfície de circulação em obra.

A constituição do pavimento (número de camadas e tipo de materiais utilizados) dependerá das solicitações às quais o pavimento será submetido durante o seu período de vida. Devido ao aumento da intensidade de tráfego, as camadas betuminosas têm aumentado a sua espessura, e, hoje em dia, os pavimentos são constituídos preferencialmente por uma base

betuminosa, em detrimento da utilização de uma base granular, o que acentua a importância do presente trabalho sobre o comportamento das misturas betuminosas.

Essencialmente, os pavimentos desempenham as seguintes funções:

- funções estruturais – reduzir as tensões verticais aplicadas ao nível da fundação, de modo a que esta resista às solicitações do tráfego, impedindo ainda o acesso de água externa às camadas granulares e ao solo de fundação;
- funções funcionais – criar uma superfície regular e resistente, com suficiente rugosidade e resistência ao desgaste, de modo a garantir segurança e comodidade de circulação.

Os pavimentos estão sujeitos a solicitações que originam a sua progressiva degradação, ao longo do seu período de vida (Figura 2.2). As solicitações dos pavimentos são essencialmente de dois tipos, que são descritos em seguida.

- A solicitação do tráfego, que consiste fundamentalmente numa acção vertical repetida e numa acção tangencial entre o pneu e o pavimento. A acção vertical origina esforços de compressão e de tracção, devido à flexão, nas camadas betuminosas e esforços de compressão nas camadas granulares. A acção do tráfego ainda origina esforços de corte em ambas as camadas.
- A solicitação dos agentes climáticos, que é constituída pela acção da água (que diminui a capacidade de carga das camadas granulares e do solo de fundação) e pela acção da temperatura (que provoca o envelhecimento do betume e propicia deformações permanentes e fendilhamento térmico).

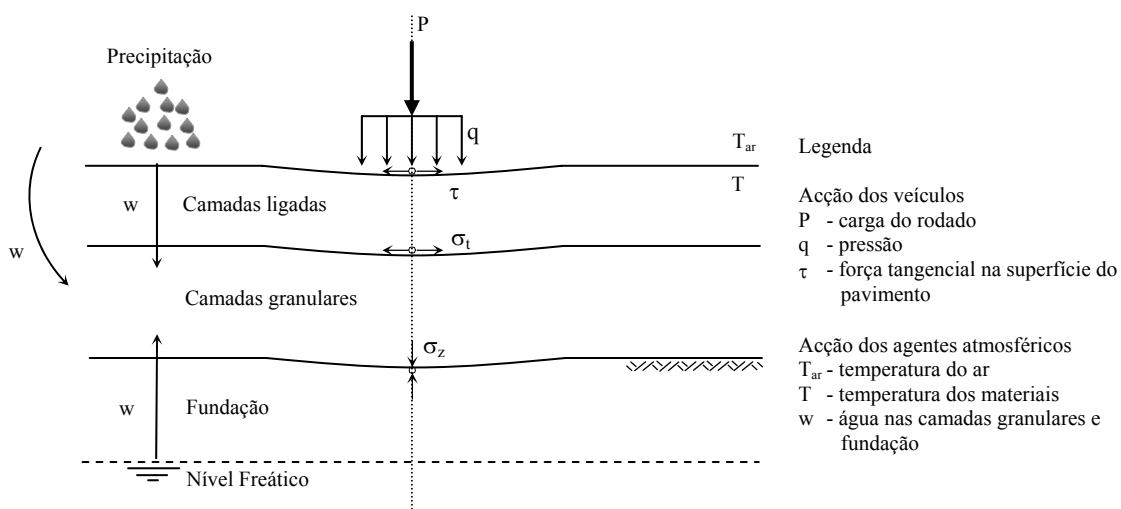


Figura 2.2 – Representação esquemática das solicitações e do modo de funcionamento dum pavimento rodoviário flexível

O modo de comportamento dos pavimentos, quando submetidos às solicitações, dependerá das características dos materiais utilizados nas várias camadas.

As camadas betuminosas estão essencialmente submetidas a flexão, devendo resistir aos esforços de tracção (σ_t), os quais originam fendilhamento por fadiga. Porém, estas camadas estão ainda submetidas a esforços tangenciais na camada de desgaste (τ), a contracções e expansões térmicas (ΔT), a esforços de corte e a esforços de compressão promovendo fenómenos de densificação por fluência que originam deformações permanentes.

As camadas granulares resistem, essencialmente, aos esforços verticais de compressão (σ_z) que originam deformações permanentes. Relativamente a este fenómeno, considera-se que a superfície do solo de fundação corresponde à zona crítica de rotura, onde, embora os esforços verticais sejam menores, as características mecânicas de resistência são mais reduzidas.

Na Figura 2.2, apresentada anteriormente, pode observar-se a evolução normal das tensões de tracção nas camadas betuminosas, e as tensões de compressão ao longo das diversas camadas, na vertical do centro de aplicação de carga de uma roda. Os gráficos apresentados nessa figura permitem observar que as tensões verticais de compressão diminuem ao longo das diversas camadas até ao solo de fundação. Por outro lado, apenas as camadas betuminosas resistem a esforços horizontais, que são de compressão junto à superfície do pavimento e atingem o seu valor máximo de tracção na parte inferior das camadas betuminosas.

Em relação aos fenómenos de fendilhamento por fadiga e de deformações permanentes, as zonas críticas consideradas nos modelos de dimensionamento são, respectivamente, a parte inferior das camadas betuminosas (onde os esforços de tracção são mais elevados) e a parte superior da fundação (onde a resistência à compressão é mais reduzida).

No entanto, devido às elevadas espessuras aplicadas actualmente nas camadas betuminosas de muitos pavimentos, o fendilhamento e as deformações permanentes com origem na superfície são degradações que ocorrem frequentemente (Freitas, 2004).

Para o cálculo dos esforços de tracção e compressão nas diversas camadas do pavimento, consideram-se as acções climáticas, a acção do tráfego, as espessuras das diversas camadas e as características mecânicas dos diferentes materiais utilizados no pavimento.

O comportamento dos pavimentos depende de dois grupos de factores: os factores activos, directamente responsáveis pela degradação do pavimento (ou seja, as acções do tráfego e do clima) e os factores passivos (propriedades do pavimento), que retardam dum modo mais ou menos eficiente a degradação, interferindo, desta forma, no desempenho do pavimento.

Os factores passivos são a estrutura do pavimento (obtida no dimensionamento), as propriedades de comportamento físico e mecânico das misturas betuminosas e materiais granulares e a qualidade de produção das misturas betuminosas e de construção do pavimento (controlo de qualidade).

A avaliação do comportamento dos pavimentos e das misturas betuminosas aplicadas nas diversas camadas é muito complexa, dado que vários mecanismos de degradação actuam em conjunto, alterando o seu desempenho.

Um comportamento inadequado dos pavimentos origina degradações prematuras. O aparecimento destas degradações obriga à reabilitação das características do pavimento, de forma a melhorar o seu comportamento funcional e estrutural, o que é feito, normalmente, através de um reforço estrutural. A problemática actual sobre a sustentabilidade ambiental justifica que a reciclagem seja uma opção viável para reabilitação das características estruturais do pavimento.

A degradação dos pavimentos rodoviários (e dos flexíveis em particular) é um processo complexo que resulta da evolução natural dos mesmos. As degradações têm uma determinada localização no pavimento e há uma determinada sequência e interacção mútua entre elas. A partir de determinada altura, este facto faz com que todo o processo de degradação seja acelerado, sobretudo no final do período de vida do pavimento.

Os vários tipos de degradações podem ser agrupados em quatro famílias, conforme se observa no Quadro 2.1. Em princípio, não se espera que ocorram todos os tipos de degradações nos pavimentos. De facto, se os pavimentos forem bem concebidos, se as misturas betuminosas forem adequadamente formuladas e se não houver problemas na produção das misturas betuminosas e na construção dos pavimentos, estes garantem uma adequada qualidade estrutural e funcional durante o período de vida previsto para o pavimento. Nestes casos,

apenas se prevê que ocorram degradações da família das deformações permanentes e do fendilhamento por fadiga.

Quadro 2.1 – Famílias e tipos de degradações (Pereira e Miranda, 1999)

FAMÍLIAS DE DEGRADAÇÕES	TIPOS DE DEGRADAÇÕES
Deformações	- Abatimento: $\left\{ \begin{array}{l} \text{- Longitudinal: } \left\{ \begin{array}{l} \text{- Berma} \\ \text{- Eixo} \end{array} \right. \\ \text{- Transversal} \end{array} \right.$ - Deformações localizadas - Ondulação - Rodeiras: $\left\{ \begin{array}{l} \text{- Grande raio (devido, principalmente, ao solo de fundação)} \\ \text{- Pequeno raio (devido às misturas betuminosas)} \end{array} \right.$
Fendilhamento	- Fadiga - Fendas: $\left\{ \begin{array}{l} \text{- Longitudinais: } \left\{ \begin{array}{l} \text{- Eixo} \\ \text{- Berma} \end{array} \right. \\ \text{- Transversais} \\ \text{- Parabólicas} \end{array} \right.$ - Pele de crocodilo: $\left\{ \begin{array}{l} \text{- Malha fina } (\leq 40 \text{ cm}) \\ \text{- Malha larga } (> 40 \text{ cm}) \end{array} \right.$
Desagregação da Camada de Desgaste	- Desagregação superficial - Cabeça de gato - Pelada - Ninhos (covas)
Movimento de Materiais	- Exsudação - Subida de finos

As outras famílias de degradações apenas ocorrem quando as misturas betuminosas são mal formuladas ou há problemas no fabrico e na construção dos pavimentos. No entanto, estas degradações também podem suceder em fases avançadas de deterioração do pavimento.

No que diz respeito à localização dos diversos tipos de degradações, verifica-se que as deformações podem acontecer, quer à superfície, quer em camadas inferiores, podendo ser causadas por problemas nas camadas betuminosas, nas camadas granulares ou no solo de fundação. O fendilhamento é um fenómeno que ocorre apenas nas camadas betuminosas. O movimento de materiais pode surgir nas camadas betuminosas (exsudação) ou nas granulares (subida de finos). O arranque de materiais ocorre à superfície, na camada de desgaste.

Relativamente à interação entre as degradações, existe uma forte relação entre as deformações e o fendilhamento. O movimento de materiais e a desagregação da camada de

desgaste estão associados ao fendilhamento e à má qualidade dos materiais, podendo esta última ser causada por uma formulação inadequada, ou por deficiências de fabrico das misturas betuminosas e de execução das camadas.

A qualidade dos materiais e as deficiências de fabrico e construção são factores que intervêm em todos os tipos de degradações que ocorrem num pavimento. Assim, é essencial ter um particular cuidado na fase de formulação das misturas betuminosas e na fase de controlo de qualidade, quer do fabrico das misturas betuminosas, quer da construção do pavimento.

2.3. Caracterização das Misturas Betuminosas

2.3.1. Composição, Estrutura, Reologia e Caracterização do Ligante Betuminoso

Antes de se proceder à formulação duma mistura betuminosa, deve caracterizar-se os materiais utilizados para sua produção. O ligante betuminoso, que ocupa entre 10 a 15% do volume da mistura betuminosa, pode ser de um dos quatro principais tipos de ligantes utilizados em misturas betuminosas:

- betumes puros;
- emulsões betuminosas;
- betumes fluidificados (*Cut-back*);
- betumes modificados.

O betume puro é obtido por destilação directa do petróleo bruto. 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 de penetração do betume puro, obtidos no ensaio de penetração, variam entre 10/20 (betumes muito duros) até 180/220 (betumes muito fluidos).

As emulsões betuminosas consistem numa mistura de água, betume e emulsionante. A função do emulsionante é envolver os glóbulos de betume para reduzir a tensão superficial entre estes e a água, de modo a permitir obter uma suspensão estável de glóbulos de betume muito finos num meio aquoso (suspensão esta pouco consistente à temperatura ambiente, ou seja, com reduzida viscosidade). Após espalhamento da emulsão produz-se a rotura da emulsão

(separação entre a água e o betume), o que permite que o betume se reúna, voltando a obter a sua viscosidade normal, enquanto que a água desaparece por evaporação e infiltração (processo de cura). Esta técnica de redução da viscosidade do betume permite a sua aplicação em misturas betuminosas a frio.

Os betumes fluidificados são obtidos por adição dum fluidificante (dissolvente volátil) ao betume puro, de modo a reduzir temporariamente a viscosidade do betume à temperatura ambiente. Desta forma, podem produzir-se e espalhar-se misturas betuminosas a temperaturas muito inferiores às utilizadas nas misturas com betumes puros. Depois de espalhada a mistura betuminosa, o fluidificante evapora, o que confere ao betume a sua viscosidade natural. Os inconvenientes de se utilizar um produto pouco económico e de se libertar vapores poluentes para a atmosfera levaram a que este tipo de ligante não seja utilizado actualmente.

Estes três tipos de ligantes podem ser modificados pela adição de determinados agentes (por exemplo, elastómeros e plastómeros) que melhoram determinadas características do betume, obtendo-se assim betumes modificados.

Relativamente à utilização de cada um destes tipos de ligante betuminoso, os betumes puros são utilizados habitualmente na produção de misturas betuminosas a quente, dado que a sua viscosidade à temperatura ambiente não lhe confere trabalhabilidade suficiente para realizar a mistura betuminosa, o mesmo se passando com os betumes modificados, sendo estes utilizados em situações mais específicas.

Os betumes fluidificados e as emulsões betuminosas são utilizados em misturas betuminosas a frio. Nesse tipo de misturas betuminosas, utilizam-se preferencialmente emulsões betuminosas, uma vez que os betumes fluidificados são pouco económicos (elevado custo do fluidificante).

Os betumes puros são os ligantes betuminosos mais utilizados, sendo assim fundamental o conhecimento da sua composição, estrutura e reologia. O betume é uma mistura química complexa de moléculas de natureza predominantemente hidrocarbonada com menores quantidades de grupos heterocíclicos¹ estruturalmente análogos e grupos funcionais contendo átomos de enxofre, nitrogénio e oxigénio (Traxler, 1963). Uma análise elementar a uma série

¹ Diz-se dos compostos em cuja fórmula de estrutura surge uma cadeia fechada, ou ciclo, de átomos que não são todos iguais.

de betumes obtidos a partir duma larga variedade de petróleos mostrou que os betumes contêm:

- carbono: 82 a 88 %;
- hidrogénio: 8 a 11 %;
- enxofre: 0 a 6 %;
- oxigénio: 0 a 1,5 %;
- nitrogénio: 0 a 1 %.

No que diz respeito à composição química do betume, este é constituído por dois grandes grupos bastante distintos, denominados asfaltenos e maltenos. Os maltenos ainda podem ser subdivididos em saturados, aromáticos e resinas. As principais conclusões quanto à reologia do betume resultam da divisão da composição química do betume nestes quatro grupos.

A técnica mais utilizada para separação do betume nestes quatro grupos consiste em precipitar os asfaltenos usando n-heptano, seguindo-se uma separação dos maltenos por cromatografia. As principais características destes quatro grupos ou fracções do betume são apresentadas em seguida.

- Os asfaltenos, cuja estrutura tipo se pode observar na Figura 2.3, 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 bastante 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.

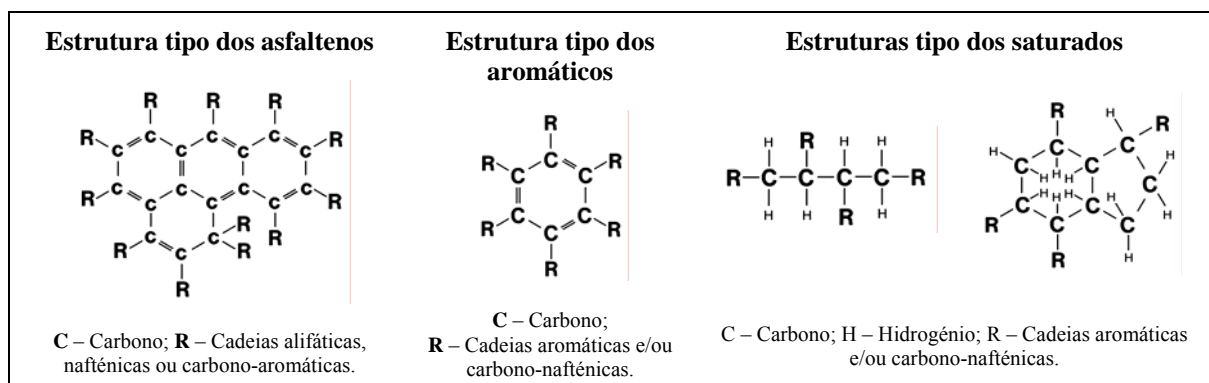


Figura 2.3 – Estrutura química tipo das fracções de asfaltenos, aromáticos e saturados dum betume (Whiteoak, 1990)

- 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 extremamente adesivas (é a fracção que inicialmente adere aos agregados). São agentes dispersivos ou peptizantes² para os asfaltenos e a proporção entre as duas fracções governa o carácter do betume (tipo solução ou tipo gelatinoso).
- Os aromáticos, cuja estrutura tipo se pode observar na Figura 2.3, 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 lineares e/ou ramificadas, cujas estruturas se podem observar na Figura 2.3. São óleos viscosos não polares de cor clara. O peso molecular médio é semelhante ao dos aromáticos e esta fracção corresponde a um valor entre 5 e 20% do betume.

Relativamente à estrutura do betume, este é considerado um sistema coloidal³ consistindo em micelas de asfaltenos de alto peso molecular dispersas num meio oleoso solvente de muito menor peso molecular (maltenos).

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, o betume tem uma estrutura tipo solução (SOL). Se as fracções de resinas e aromáticos não forem suficientes 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).

Na prática os betumes têm uma estrutura intermédia (entre SOL e GEL). O grau de dispersão dos asfaltenos influencia consideravelmente a viscosidade do sistema. Conforme a

² Provocam a dispersão espontânea de uma substância sólida num líquido quando se adiciona uma pequena quantidade de uma terceira substância, o agente peptizante (a peptização é o inverso da floculação).

³ Suspensão de partículas extremamente pequenas (micelas), cujo diâmetro varia entre 1 e 100 milimícrones, no seio de um líquido ou de um gás.

temperatura do betume aumenta, a sua estrutura aproxima-se cada vez mais do carácter tipo SOL, sendo que os betumes tipo GEL perdem por vezes o seu carácter. A viscosidade dos maltenos depende do seu peso molecular, sendo a viscosidade tanto maior quanto maior for o peso molecular. O aumento da fracção de saturados diminui a capacidade dos maltenos dispersarem os asfaltenos, levando a uma maior aglomeração dos mesmos. A existência de elevadas quantidades de asfaltenos e saturados aumenta a fragilidade dos betumes a baixas temperaturas, a viscosidade e o carácter tipo GEL dos betumes.

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 do teor em saturados amolece o betume. Por sua vez, o aumento do teor em resinas endurece o betume, reduzindo o índice de penetração e a susceptibilidade ao corte, aumentando a adesividade e a viscosidade. Os asfaltenos têm um papel muito importante na reologia do betume. Assim, o aumento do teor em asfaltenos endurece o betume, reduzindo o índice de penetração e a susceptibilidade ao corte, e aumentando a viscosidade. No entanto, mais importante que o teor em asfaltenos é a forma como estes se encontram associados no meio dispersivo. Assim, quando os asfaltenos se encontram associados em entidades esféricas não dissolvidas a viscosidade do betume aumenta significativamente.

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.

Quando o betume é utilizado num pavimento, ocorre uma variação da sua composição ao longo do tempo, devido ao seu envelhecimento. A Figura 2.4 apresenta o aumento do envelhecimento do betume nas fases de mistura, compactação e durante o tempo de serviço no pavimento, assim como a evolução da percentagem de cada fracção do betume na sua composição, devido ao envelhecimento do betume ao longo do tempo. A percentagem de asfaltenos e saturados aumenta ao longo do tempo, diminuindo a quantidade das fracções com capacidade de dispersão, resultando este fenómeno no envelhecimento do betume devido a um aumento significativo da sua viscosidade.

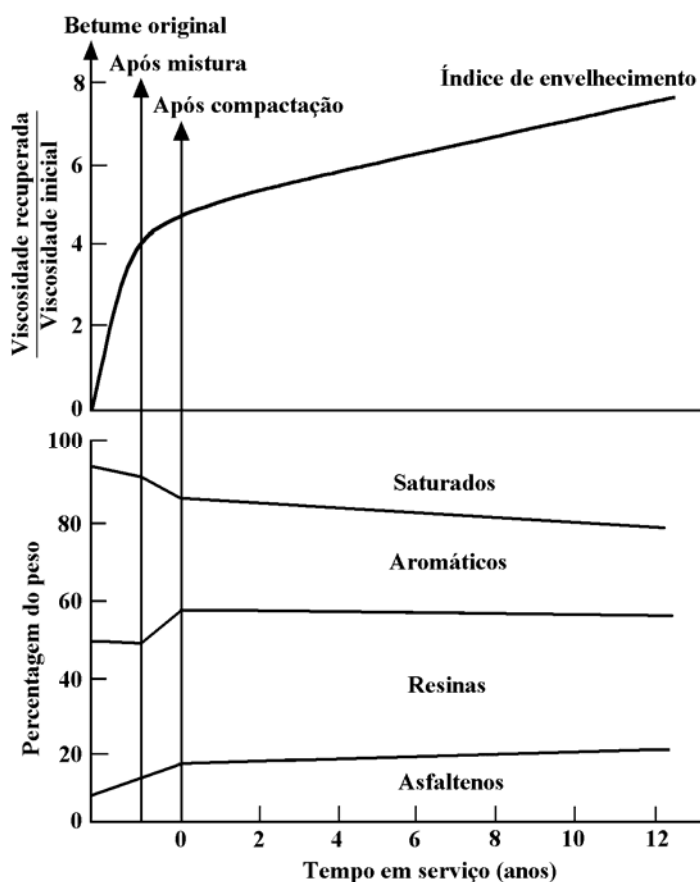


Figura 2.4 – Variação do envelhecimento e alterações na composição do betume durante a mistura, espalhamento e vida em serviço no pavimento (Whiteoak, 1990)

A caracterização dos betumes puros é feita através de um conjunto de ensaios que medem o seu comportamento a diversas temperaturas. Os ensaios utilizados tradicionalmente para caracterização dos betumes puros são os seguintes:

- penetração do betume, a 25 °C, durante 5 segundos (EN 1426);
- ponto de amolecimento “anel e bola” (EN 1427);
- ponto de fragilidade de Fraass (EN 12593);
- viscosidade cinemática a 60 °C e a 135 °C (ASTM D 2170 e EN 12595);
- ponto de inflamação no *Cleveland Open Cup* (EN 2592);
- perda de massa por aquecimento a 163 °C (ASTM D 2872);
- ensaios de envelhecimento TFOT e RTFOT (EN 12607-2 e EN 12607-1);
- ductilidade a 25 °C (ASTM D 113);
- recuperação elástica (AASHTO T 301-99);
- solubilidade no tricloroetileno (pureza do betume) (EN 12592)⁴.

⁴ Actualmente, nos ensaios que utilizam solventes, o tricloroetileno foi substituído por tolueno ou xileno, uma vez que o manuseamento do tricloroetileno pode causar problemas de saúde.

Um dos principais ensaios de caracterização dos betumes é o ensaio de penetração, dado que permite classificar indirectamente a viscosidade dos betumes puros. Neste ensaio, mede-se a profundidade de penetração dum agulha com 100 gramas numa amostra de betume à temperatura de 25 °C, durante 5 segundos (Figura 2.5).

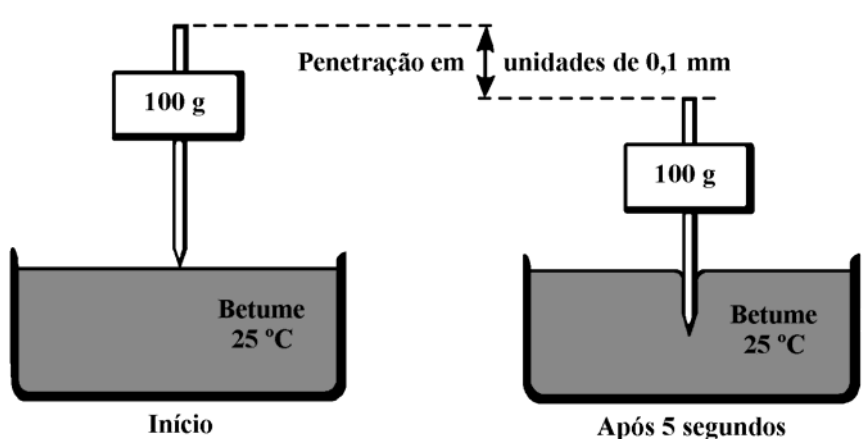


Figura 2.5 – Esquema representativo do ensaio de penetração (Asphalt Institute, 1989)

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 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 (Figura 2.6).

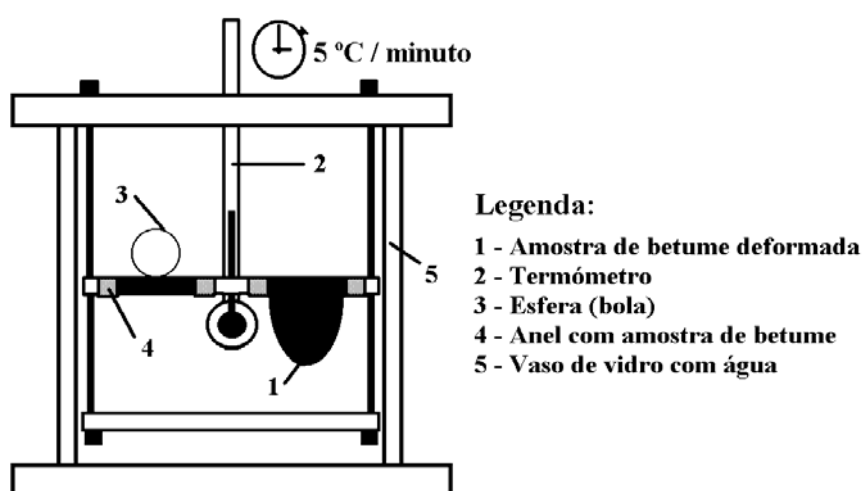


Figura 2.6 – Ensaio para determinação do ponto de amolecimento pelo método do anel e bola
(Pereira e Picado-Santos, 2002)

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. Se for provável que o betume atinja temperaturas no pavimento inferiores àquela determinada neste ensaio, não é aconselhável a sua utilização, porque nesse caso pode ocorrer fendilhamento térmico da mistura betuminosa a baixas temperaturas.

O ensaio para determinação da viscosidade 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 através 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, multiplicado por um factor correctivo (que depende do equipamento utilizado). A viscosidade cinemática do betume exprime-se em m²/s, ou mais frequentemente em mm²/s (centistoke – cSt), e relaciona-se com a viscosidade dinâmica (expressa em Pa.s) através da seguinte expressão:

$$\text{Viscosidade cinemática} = \frac{\text{Viscosidade dinâmica}}{\text{Massa Específica}} \quad (2.1)$$

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 ou compactação.

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. Quando aquecido a elevadas temperaturas, o betume liberta fumos que são combustíveis. 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.

Os diversos procedimentos de ensaio que permitem determinar o envelhecimento do betume são indicados, em pormenor, na Secção 3.7.1, quando se referem os ensaios mais directamente relacionados com o comportamento da ligação agregado-mastique.

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 retidos no filtro são as impurezas do betume.

Os resultados obtidos em alguns dos ensaios de caracterização do betume, descritos anteriormente (penetração, temperatura de amolecimento, ponto de Fraass, viscosidade cinemática), permitem traçar o diagrama BTCD (*Bitumen Test Data Chart*), (Figura 2.7), que indica o comportamento do betume a diversas temperaturas.

Com base neste diagrama, pode determinar-se as temperaturas de mistura e de compactação ideais (correspondentes às viscosidades indicadas na Figura 2.7) 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.

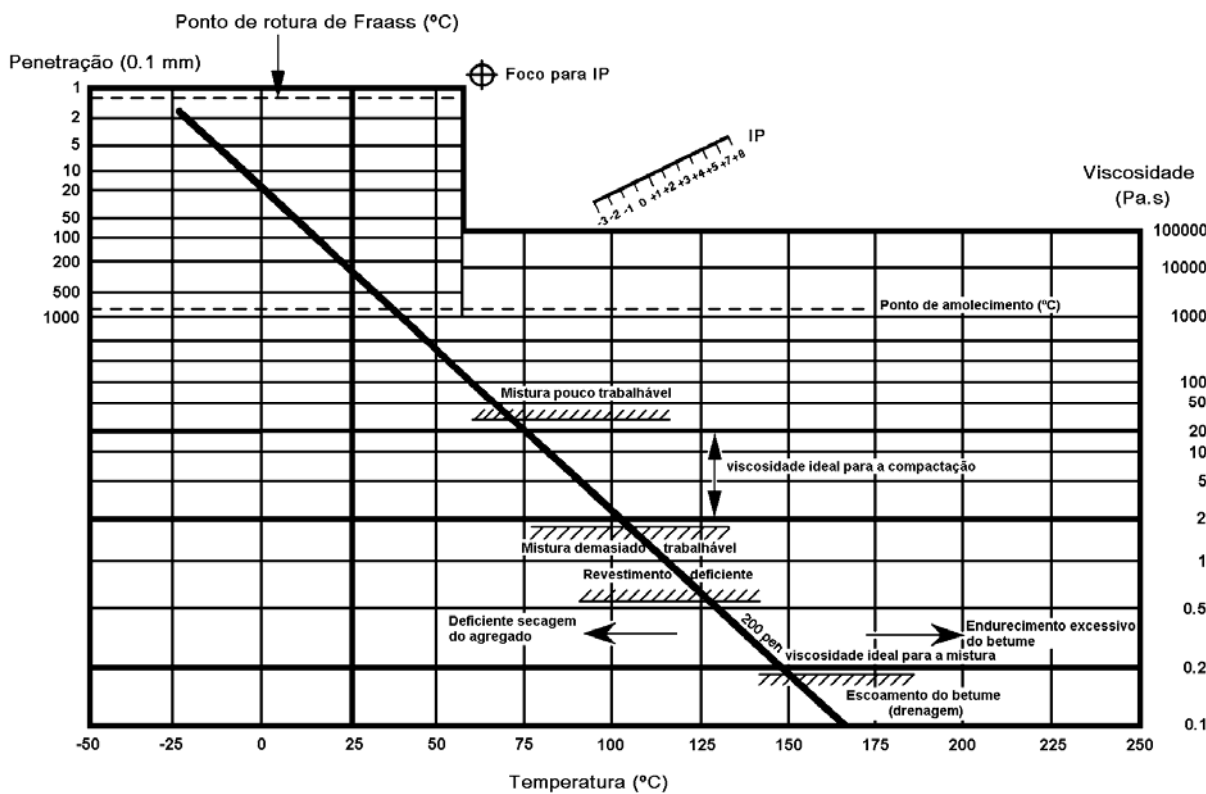


Figura 2.7 – Diagrama BTCD: viscosidades “ideais” para a mistura e compactação de misturas betuminosas (Heukelom, 1970)

As características exigidas aos betumes são indicadas em diversas especificações (ASTM, AASHTO, Normas Europeias, APORBET) devendo ser cumpridas obrigatoriamente, de modo a evitar um comportamento indesejado das misturas betuminosas em serviço.

Os betumes podem ser modificados por aditivos (fíler, aditivos de adesividade, anti-oxidantes, componentes organo-metálicos, enxofre, entre outros), por polímeros (plastómeros, elastómeros naturais ou sintéticos, borrachas recuperadas e fibras orgânicas ou inorgânicas, resinas e endurecedores) ou através de reacções químicas. A modificação dos betumes tem por objectivo melhorar determinadas características do betume, fundamentais para um desempenho adequado da mistura betuminosa em serviço.

Os ensaios utilizados para caracterização dos betumes modificados são os mesmos utilizados para os betumes puros, salientando-se o ensaio de recuperação elástica. No entanto, os ensaios tradicionais para caracterização dos betumes não se têm mostrado totalmente adequados, o que levou ao desenvolvimento de novos métodos para caracterização dos ligantes betuminosos.

Nos Estados Unidos da América, no âmbito do programa SHRP (*Strategic Highway Research Program*), foram desenvolvidos nos últimos anos novos ensaios para caracterização de ligantes betuminosos (puros ou modificados). Estes ensaios permitem determinar propriedades que se baseiam no comportamento dos betumes em serviço (os ensaios empíricos tradicionais, atrás citados, avaliam indirectamente o comportamento do betume).

Estes novos ensaios permitem classificar o betume dentro de um determinado grau PG (*performance grade*), que deverá satisfazer as exigências para utilização do betume no pavimento. O grau PG exigido ao betume depende das temperaturas mínima e máxima no local da obra e do tráfego de projecto.

Em relação aos tradicionais, estes novos ensaios, baseados no comportamento do betume em serviço, garantem uma previsão mais adequada do desempenho do betume no pavimento, especialmente, no caso de betumes modificados (Isacsson and Lu, 1998).

Neste método de classificação do betume, é usada inicialmente uma estufa para envelhecimento do filme de betume (simula o envelhecimento a curto prazo) e uma câmara de envelhecimento pressurizada (simula o envelhecimento a longo prazo).

Posteriormente, para avaliar o comportamento do betume em várias condições de serviço, podem ser realizados os três ensaios a seguir descritos.

- O ensaio de flexão estática, que mede as características do ligante betuminoso a baixas temperaturas, quando este se comporta como um sólido visco-elástico. Ensaiam-se vigas de betume à flexão em três pontos (dois pontos de apoio e um ponto de carregamento central), estando estas imersas num líquido que não as congele. Durante o ensaio, 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, que 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, que mede a torção necessária para manter constante a velocidade de rotação de um cilindro dentro do betume, medindo assim a sua

viscosidade. O conhecimento do valor da viscosidade dum betume é essencial para assegurar uma fluidez suficiente que permita a sua mistura com os agregados.

2.3.2. Caracterização dos Agregados

Antes de se proceder à aplicação dos métodos de formulação, é necessário caracterizar os agregados, os quais constituem 75% a 85% do volume da mistura betuminosa. Os agregados devem ser analisados relativamente à sua origem geológica e à sua composição química. Os agregados 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 propriedades dos agregados 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 usados tradicionalmente para caracterização dos agregados são os seguintes:

- análise granulométrica (ASTM C 136-96a; EN 933-1);
- determinação da resistência ao esmagamento (ASTM C 142-97);
- determinação da resistência ao choque e abrasão na máquina Los Angeles (ASTM C 131);
- determinação do índice de lamelação e alongamento (BS 812 Part 105; EN 933-4);
- determinação do coeficiente de polimento acelerado usando o pêndulo britânico (ASTM D 3319-90);
- determinação da absorção de água (ASTM C 128-97);
- determinação da baridade específica (ASTM C 127-88);
- determinação do equivalente de areia (EN 933-8);
- determinação do valor de azul de metileno (EN 933-9);
- determinação da baridade aparente (ASTM C 29/C 29 M-97).

A granulometria dos agregados (estudada no processo de formulação das misturas betuminosas) é uma das principais características responsáveis pelo comportamento das

misturas betuminosas. A determinação da granulometria dos agregados é realizada através da peneiração dos mesmos (Figura 2.8) 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 depois 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 de polimento acelerado, o que permite determinar a perda de rugosidade superficial dos agregados, avaliada através do coeficiente de polimento acelerado (CPA).

A forma e a textura dos agregados também devem ser analisadas, dado que estas propriedades influenciam o comportamento das misturas betuminosas. Por exemplo, não devem ser utilizados seixos provenientes de rios em misturas betuminosas, por terem uma textura muito lisa e uma forma muito redonda, o que reduz a adesividade com o ligante, o atrito e a resistência às deformações permanentes. Assim, os agregados devem ser de preferência britados e rugosos.

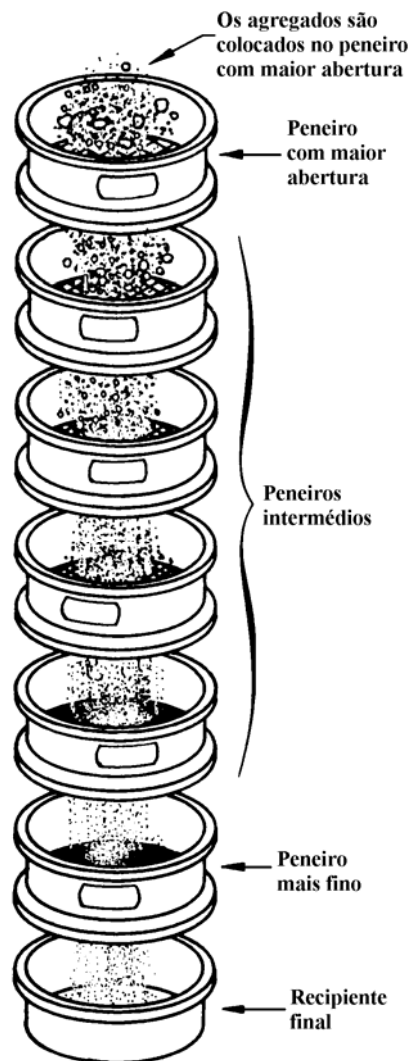


Figura 2.8 – Determinação da granulometria dos agregados (Asphalt Institute, 1989)

A forma dos agregados é caracterizada pelos índices de forma: o índice de alongamento e lamelação. Deste modo, para uma determinada fracção granulométrica (d/D) deve determinar-se a percentagem de partículas alongadas⁵ e lamelares⁶ existentes nos agregados, dado que o excesso destas partículas diminui a estabilidade da mistura betuminosa ou contribui para um excesso de ligante.

O ensaio de absorção de água mede a quantidade de água absorvida pelos agregados, o que indica a porosidade dos agregados e, em parte, a quantidade de betume que estes absorvem. 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 coesão (falta de ligação entre os componentes da mistura betuminosa).

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 esta resulta numa resistência reduzida das misturas betuminosas.

As características exigidas aos agregados, indicadas em diversas especificações (APORBET, Cadernos de Encargos, Especificações do LNEC, entre outras), devem ser respeitadas, de modo a evitar um comportamento indesejado das misturas betuminosas em serviço.

⁵ Agregados com comprimento superior a $1,5 \times \frac{d+D}{2}$.

⁶ Agregados com espessura inferior a $0,6 \times \frac{d+D}{2}$.

2.3.3. Influência do Comportamento das Misturas Betuminosas no Desempenho dos Pavimentos Rodoviários Flexíveis

O comportamento duma mistura betuminosa depende do desempenho global do pavimento. Na fase de formulação duma mistura betuminosa, deve considerar-se a estrutura do pavimento em que camada a mistura betuminosa será aplicada (e as suas principais funções) e as acções do tráfego e do clima a actuar sobre o pavimento. A composição a escolher e as exigências colocadas à mistura betuminosa dependem desses factores.

O comportamento das misturas betuminosas também influencia o desempenho da estrutura do pavimento. Como exemplo, pode considerar-se que a utilização duma mistura betuminosa de elevado módulo de rigidez, ao reduzir os esforços de tracção nas camadas betuminosas e os esforços de compressão ao nível do solo de fundação, melhorará o comportamento da estrutura do pavimento, diminuindo a probabilidade de ocorrer fendilhamento por fadiga ou deformações permanentes com origem no solo de fundação. No entanto, para reduzir a ocorrência de fendilhamento por fadiga no pavimento aconselha-se a utilização de misturas betuminosas com uma elevada resistência à fadiga, por exemplo, misturas com um elevado teor em betume.

Relativamente às deformações permanentes com origem nas camadas betuminosas (associadas a elevada espessura das camadas betuminosas, em conjunto com um tráfego lento e temperaturas elevadas), pode evitar-se este tipo de degradação utilizando misturas betuminosas com uma maior resistência à fluência e ao corte, o que pode ser alcançado, por exemplo, com um betume mais duro ou um menor teor em betume.

Uma adequada resistência ao fendilhamento térmico é conseguida através da escolha de um betume com uma temperatura de fragilidade de Fraass inferior à temperatura mínima da região onde a mistura betuminosa será utilizada. A temperatura de fragilidade de Fraass está relacionada com o aumento de viscosidade do betume a baixas temperaturas, que se traduz por um aumento de rigidez das misturas betuminosas e por um comportamento frágil do betume (reduzida deformabilidade quando sujeito às acções do tráfego).

A resistência ao desgaste e a rugosidade dependem do tipo de mistura betuminosa utilizada na camada de desgaste e da resistência ao desgaste dos agregados. A ligação agregado-mastique

também influencia o comportamento da mistura betuminosa, ao impedir o arranque de materiais. De acordo com Scholz (1995), uma fraca ligação agregado-mastique também reduz a resistência das misturas betuminosas ao fendilhamento e às deformações permanentes, ao permitir que as fendas progridam mais rapidamente nestas zonas mais frágeis e ao facilitar a deformação dos materiais.

As características e a quantidade de mastique existente na mistura betuminosa também influenciam o comportamento do pavimento. De facto, maiores quantidades de mastique aumentam a sua resistência à fadiga e diminuem a resistência às deformações permanentes, acontecendo o mesmo quando se utilizam mastiques mais ricos em betume.

Também é importante compreender a evolução do comportamento dum mistura betuminosa ao longo do tempo. Em serviço, ocorre um fenómeno de envelhecimento das misturas betuminosas assim como uma pós-compacção originada pela passagem do tráfego.

O envelhecimento do betume melhora o desempenho do pavimento, dado que aumenta o módulo de rigidez das camadas betuminosas. No entanto, este fenómeno torna estas camadas mais frágeis, diminuindo a resistência ao fendilhamento por fadiga. A pós-compacção também aumenta a resistência do pavimento, ao melhorar a densidade das misturas betuminosas; porém pode provocar deformações permanentes e, no limite, causar a instabilidade das misturas betuminosas.

Em resumo, pode concluir-se que o desempenho do pavimento é muito influenciado pelo comportamento das misturas betuminosas utilizadas, o que motivou o seu estudo no presente trabalho.

2.3.4. Composição das Misturas Betuminosas

O estudo da composição das misturas betuminosas é fundamental para que estas tenham um desempenho adequado em serviço. De facto, o comportamento das misturas betuminosas no pavimento depende, para além das características dos seus componentes, da sua composição volumétrica (Figura 2.9).

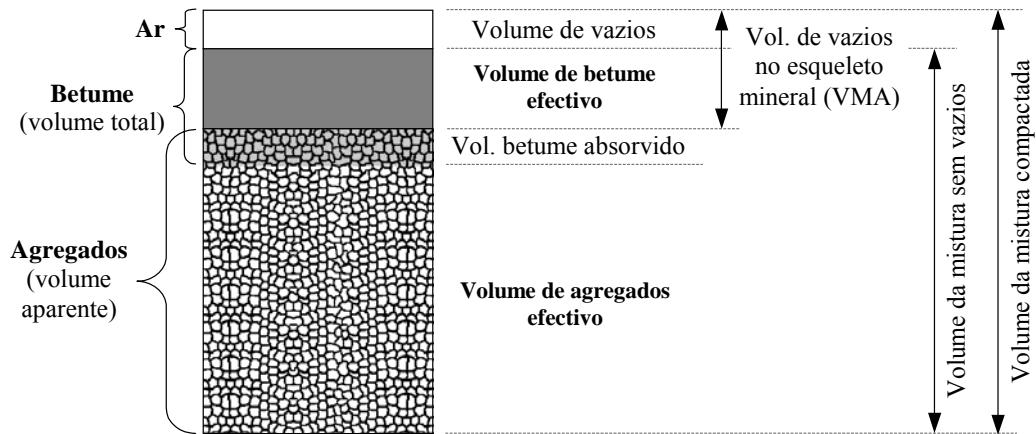


Figura 2.9 – Composição volumétrica duma mistura betuminosa (adaptado de Asphalt Institute, 1989)

Para uma melhor compreensão dos vários parâmetros volumétricos de composição, na Figura 2.10 (Capitão, 1996) apresenta-se a sua representação esquemática.

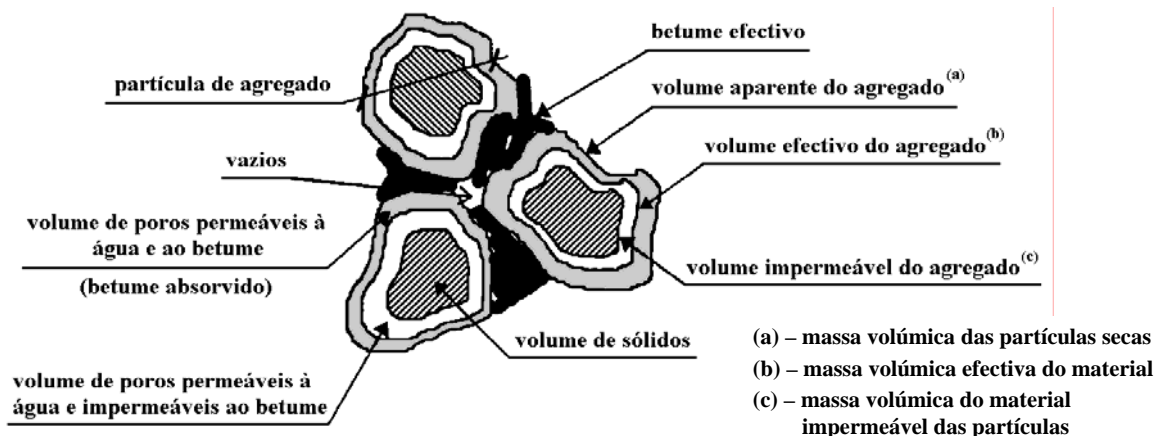


Figura 2.10 – Representação esquemática da relação entre as diferentes massas volúmicas do material granular de uma mistura betuminosa (Capitão, 1996)

Nas Figuras 2.9 e 2.10, pode observar-se que os principais materiais que compõem as misturas betuminosas são o ligante betuminoso e os agregados. Além disso, há sempre um determinado volume da mistura betuminosa compactada que é ocupado por ar (volume de vazios). Para melhorar certas características da mistura betuminosa podem ser acrescentados aditivos (por exemplo, polímeros, para aumentar a flexibilidade, ou derivados químicos da amónia, para aumentar a ligação masticue-agregado).

Cada um dos componentes da mistura betuminosa desempenha determinadas funções. Os agregados exercem diferentes funções na mistura betuminosa, dependendo das suas

dimensões (agregados grossos, finos e filer). Os agregados grossos desempenham as seguintes funções na mistura betuminosa:

- garantir estabilidade à mistura betuminosa (resistência às deformações permanentes);
- aumentar a resistência mecânica das misturas betuminosas (aumento do módulos de rigidez das misturas betuminosas);
- assegurar rugosidade superficial suficiente para a circulação dos veículos (capacidade da mistura betuminosa de garantir a aderência pneu-pavimento).

Os agregados finos, de dimensões inferiores a 2,00 mm (Texas Department of Transportation, 2004), permitem que as misturas betuminosas obtenham estabilidade e compacidade (propriedade relacionada com o arranjo estrutural dos agregados, controlada pelo valor do volume de vazios no esqueleto mineral – VMA).

O filer (material passado no peneiro #200) é responsável pela compacidade e impermeabilidade da mistura betuminosa. Além disso, as características físicas e químicas do filer influenciam o comportamento da mistura betuminosa (por exemplo, a utilização de um filer calcário ou a adição de cal hidráulica melhora a ligação agregado-mastique). De acordo com Hesp et al. (2001), a utilização de diferentes tipos de filer em misturas betuminosas aparentemente iguais, origina frequentemente um comportamento muito diferente dessas misturas betuminosas no pavimento. Assim, justifica-se neste trabalho a avaliação sobre a influência do tipo de filer no comportamento das misturas betuminosas.

O ligante betuminoso ocupa uma parte do volume de vazios no esqueleto mineral da mistura betuminosa e há ainda uma determinada quantidade de betume absorvido pelos agregados, a qual depende da porosidade dos agregados. O ligante betuminoso desempenha as seguintes funções na mistura betuminosa:

- permitir a ligação entre os agregados, de modo a que a mistura betuminosa tenha resistência à tracção;
- garantir flexibilidade à mistura betuminosa (resistência ao fendilhamento sob a acção das cargas);
- assegurar impermeabilidade e durabilidade à mistura betuminosa (resistência à acção dos agentes climáticos);
- conferir trabalhabilidade à mistura betuminosa, garantindo condições adequadas de produção em central e compactação *in situ*.

Os vazios desempenham igualmente um papel importante nas misturas betuminosas. De facto, as misturas betuminosas com um volume de vazios elevado são mais permeáveis, menos duráveis e têm uma menor resistência às deformações permanentes que ocorrem devido à pós-compacção realizada pelo tráfego. As excepções são as misturas betuminosas porosas e drenantes, que utilizam aditivos e técnicas construtivas adequadas para anular ou diminuir os efeitos negativos do elevado volume de vazios. Quando o volume de vazios é demasiado 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.

Os agregados utilizados na mistura betuminosa não devem ser muito porosos (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.

Para cada camada do pavimento, e em cada situação específica de tráfego e clima, é fundamental que se seleccione o tipo de mistura betuminosa mais adequado a utilizar (dependendo do tipo e espessura da camada onde a mistura betuminosa será aplicada, e das suas funções). Nas especificações apresentadas pela APORBET (1998), são indicadas as diversas misturas betuminosas tradicionalmente aplicadas em Portugal, assim como as exigências relativamente aos agregados, ao betume e às misturas betuminosas. Estas últimas referem-se a valores a determinar no ensaio de Marshall e aos parâmetros volumétricos a obter com as misturas betuminosas compactadas através do procedimento indicado para o ensaio de Marshall.

A composição volumétrica da mistura betuminosa deve ser estudada em pormenor, durante a formulação, para que esta possa ter um desempenho adequado em serviço. Essencialmente, determina-se a relação entre as diversas fracções dos agregados (curva granulométrica), o teor em betume e o volume de vazios que, para determinado ligante e agregados, garantem um comportamento adequado da mistura betuminosa.

Para que as misturas betuminosas tenham um comportamento adequado em serviço, é necessário que estas possuam determinadas características. Em função do tipo de mistura betuminosa a formular, e dependendo das condições em que a mistura será aplicada e funcionará em serviço, algumas destas características são mais importantes que outras.

Quando se procede à formulação duma mistura betuminosa, devem ser escolhidos os ensaios de caracterização mais apropriados, em função das condições específicas em que a mistura betuminosa vai funcionar em serviço. Assim, por exemplo, em climas frios é fundamental estudar o fendilhamento térmico a baixas temperaturas, enquanto que, em climas moderados a quentes é muito mais importante avaliar a resistência às deformações permanentes nas misturas betuminosas.

Ao mesmo tempo, também é importante conhecer a influência da composição volumétrica no comportamento das misturas betuminosas, conforme se apresenta no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 – Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas

Propriedades	Definição	Variáveis que afectam as propriedades das misturas betuminosas
Flexibilidade	Aptidão da mistura em se adaptar às deformações das camadas subjacentes	- Granulometria - Teor em betume - Rigidez do betume
Estabilidade	Resistência às deformações plásticas (usualmente a altas temperaturas e longos tempos de carga) – condições para baixos E_{mist}	- Textura da superfície do agregado - Granulometria - Teor em betume
Durabilidade	Resistência às acções climáticas (ar e água) e à acção abrasiva do tráfego	- Granulometria - Teor em betume - Grau de compactação - Sensibilidade à água
Resistência à fadiga	Aptidão da mistura em resistir a esforços de flexão repetidos sem fendilhar	- Granulometria - Teor em betume - Rigidez do betume - Grau de compactação
Resistência à derrapagem	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
Impermeabilidade	Aptidão da mistura em impedir o acesso da água às camadas inferiores	- Granulometria - Teor em betume - Grau de compactação
Trabalhabilidade	Facilidade para realizar as operações de fabrico, colocação e compactação	- Granulometria - Teor em betume - Tipo de betume e de agregado

Em geral, verifica-se que um aumento do teor em betume aumenta a resistência ao fendilhamento, a trabalhabilidade, a impermeabilidade e a durabilidade, mas, em contrapartida, diminui a resistência às deformações permanentes e a aderência pneu-pavimento.

A granulometria influencia todas as características de comportamento da mistura betuminosa. Na prática, uma mistura adequada de elementos finos, médios e grossos, com uma densidade elevada, é aquela que permite obter melhores características de comportamento para a mistura betuminosa (Curtis et al., 1993).

A diminuição do volume de vazios (também associada ao grau de compactação) permite melhorar o comportamento geral do pavimento, embora este volume não deva ser inferior a 3,0%, de modo a evitar problemas de instabilidade da mistura betuminosa.

A escolha de betumes mais duros melhora o comportamento do pavimento, embora possa tornar as misturas betuminosas mais frágeis. A selecção de agregados e betumes, que tenham uma adesividade mais elevada, também melhora o comportamento da mistura betuminosa.

A utilização de aditivos permite modificar várias características das misturas betuminosas, sem alterar a sua composição, ao melhorar a resistência ao fendilhamento (betume modificado com polímeros) e a adesividade (agentes de adesividade) ou ao diminuir a susceptibilidade térmica (plastificantes), entre outras.

Conforme se observou, o comportamento das misturas betuminosas depende das características de cada um dos componentes elementares que a compõem. Assim, durante o estudo das misturas betuminosas, impõe-se que os agregados e o ligante betuminoso sejam correctamente caracterizados, de modo a que o desempenho das misturas betuminosas não seja comprometido pelo comportamento inadequado dos seus constituintes.

2.3.5. Formulação de Misturas Betuminosas

A formulação duma mistura betuminosa consiste num conjunto de procedimentos e ensaios realizados para seleccionar o tipo de agregados, a curva granulométrica, o tipo e teor em betume e o tipo e quantidade de aditivos dessa mistura betuminosa.

No sentido de auxiliar a exposição dos diferentes métodos de formulação, estes foram reunidos em categorias, de acordo com as propostas do RILEM Report 17 (Luminari and Fidato, 1998): i) tipo “receita”; ii) empíricos; iii) analíticos; iv) volumétricos; v) relacionados com o comportamento das misturas betuminosas; vi) baseados no comportamento das

misturas betuminosas⁷. Segundo estes autores, de acordo com o Quadro 2.3, foram considerados nove critérios para classificar as diferentes categorias de métodos de formulação.

Quadro 2.3 – Categorias de métodos de formulação e respectivos critérios
 (adaptado de Luminari and Fidato, 1998)

Categorias de métodos de formulação	Critérios em que se baseia a formulação								
	Baseado na experiência com misturas de composição conhecida	Produção e compactação de provetes	Critérios Volumétricos	Análise e Composição Volumétrica	Compactação de provetes reproduz o processo <i>in situ</i>	Utilização de Ensaio Empíricos	Utilização de Ensaio de Simulação	Utilização de Ensaio Fundamentais	Modelo de previsão do comportamento no pavimento
Tipo “receita”	X								
Empíricos		X	X			X			
Analíticos		X	X	X		X			
Volumétricos		X	X	X	X		X		
Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas		X	X	X	X		X	X	
Baseados no comportamento das misturas betuminosas		X	X	X	X		X	X	X

Ao longo dos anos, a necessidade de obter misturas betuminosas com melhor qualidade, associada ao aperfeiçoamento dos equipamentos de ensaio disponíveis, levou à evolução dos métodos de formulação de misturas betuminosas. Até meados do século XX, a formulação de misturas betuminosas era realizada através de especificações ou “receitas” pelas quais se obteve resultados positivos face à experiência acumulada na sua utilização.

Mais tarde surgiram nos Estados Unidos da América os métodos de formulação empíricos (sendo o método de Marshall o mais conhecido) que foram o primeiro passo para a evolução dos métodos de formulação. O método de Marshall continua a ser o mais utilizado a nível mundial, inclusive em Portugal.

⁷ Os métodos denominados “relacionados com o comportamento” utilizam ensaios que simulam determinado comportamento da mistura betuminosa, mas que apenas permitem alcançar uma medida indirecta desse comportamento *in situ*. Os métodos designados como “baseados no comportamento”, diferem destes ao permitirem estimar o comportamento das misturas betuminosas no pavimento e a sua evolução ao longo do tempo. Para formulação, os primeiros apenas utilizam ensaios que simulam o comportamento, enquanto que os últimos se baseiam nestes ensaios e em modelos de comportamento, para prever o comportamento da mistura a formular, ao longo do tempo, em determinado pavimento e em condições de serviço definidas.

Nas últimas décadas registou-se um aumento na agressividade do tráfego, o que originou maiores exigências relativamente ao comportamento das misturas betuminosas e da estrutura do pavimento, sendo por isso necessário utilizar misturas betuminosas mais duráveis e camadas betuminosas mais espessas.

Para melhorar o comportamento das misturas betuminosas recorre-se a métodos de formulação, com os quais se procura determinar as proporções ponderais de cada componente da mistura betuminosa, usando os materiais disponíveis, de modo a obter um comportamento óptimo em serviço, de acordo com o tráfego, as condições climáticas e estruturais a que o pavimento e a mistura betuminosa estão sujeitas.

Apesar do método de Marshall continuar a ser o mais utilizado, os métodos de formulação de misturas betuminosas mais recentes recorrem a procedimentos que simulam o comportamento das misturas betuminosas durante a produção, espalhamento e compactação e, posteriormente, durante o seu período de vida em serviço. Os métodos de formulação mais recentes baseiam-se, essencialmente, em ensaios que permitem avaliar determinadas propriedades das misturas betuminosas, podendo recorrer-se aos seguintes ensaios para formulação das misturas betuminosas: i) ensaios empíricos; ii) ensaios fundamentais; iii) ensaios de simulação (Luminari and Fidato, 1998).

Os ensaios empíricos (Luminari and Fidato, 1998) apenas permitem obter, dum modo genérico, o conhecimento sobre o comportamento das misturas betuminosas e não possibilitam a determinação das suas propriedades intrínsecas⁸. Por exemplo, o resultado obtido no ensaio de Marshall apenas permite avaliar, genericamente, o comportamento da mistura betuminosa, não sendo possível determinar, por exemplo, o módulo de rigidez. Neste tipo de ensaios, a compactação realizada para preparação dos provetes e o tipo de carregamento utilizado nos ensaios não são representativos da compactação e do comportamento real das misturas betuminosas.

Os ensaios fundamentais (Luminari and Fidato, 1998) possibilitam a determinação das propriedades intrínsecas das misturas betuminosas e a avaliação do seu comportamento em

⁸ Propriedades intrínsecas de um objecto são aquelas propriedades que o objecto tem apenas em virtude da sua natureza, apenas em virtude de ser o objecto que é, ou seja, da sua existência e identidade; e não em virtude da existência ou identidade de algum objecto totalmente distinto dele (por exemplo, massa, baridade, módulo de rigidez, coeficiente de Poisson).

serviço. Por exemplo, no ensaio de flexão em quatro pontos pode determinar-se o módulo de rigidez (propriedade intrínseca) e a resistência das misturas betuminosas ao fendilhamento por fadiga (comportamento da mistura betuminosa). As propriedades das misturas obtidas nestes ensaios podem ser utilizadas em modelos mecanicistas de dimensionamento do pavimento.

Os ensaios de simulação (Luminari and Fidato, 1998) reproduzem em laboratório os processos de espalhamento e compactação *in situ* (por exemplo, o compactador de corte giratório), ou o comportamento da mistura betuminosa durante o período de vida do pavimento (por exemplo, o ensaio *wheel tracking*). No entanto, estes ensaios não conseguem determinar propriedades intrínsecas da mistura betuminosa.

Os ensaios fundamentais e de simulação utilizam equipamentos que permitem aplicar modos de carregamento mais complexos que os tradicionais ensaios empíricos. Assim, esses ensaios procuram simular o funcionamento das misturas betuminosas em serviço, ao representar aproximadamente a distribuição de tensões ou extensões no pavimento que originam determinada degradação.

A utilização destes ensaios, com o objectivo de apoiar o estudo da composição das misturas betuminosas que permite melhorar o seu comportamento em serviço, conduziu ao desenvolvimento de vários métodos de formulação. No entanto, a complexidade deste tipo de ensaios utilizados para caracterizar as misturas betuminosas, originou um aumento do tempo e dos custos associados ao processo de formulação.

Este facto levou ao desenvolvimento, na Bélgica, dos métodos analíticos que procuram caracterizar as misturas betuminosas através de cálculos analíticos, envolvendo propriedades volumétricas, reduzindo assim o número de ensaios realizados.

Posteriormente foram desenvolvidos novos procedimentos e equipamentos de compactação em laboratório, que procuram simular a compactação *in situ* (modo e intensidade de compactação). As misturas betuminosas compactadas em laboratório através destes novos procedimentos têm características volumétricas semelhantes às obtidas nos pavimentos e, assim, permitem efectuar a formulação com base em parâmetros volumétricos. Neste sentido, foi desenvolvido o compactador de corte giratório (equipamento de compactação e ensaio), que está na base de grande parte dos mais recentes métodos de formulação volumétrica.

Recentemente, surgiram os métodos de formulação relacionados com o comportamento das misturas betuminosas. Nestes métodos de formulação, os ensaios utilizados permitem obter uma melhor correlação entre os resultados obtidos em laboratório e o comportamento observado *in situ*, ao medir a resposta das misturas betuminosas num estado de tensão análogo ao que existe no pavimento.

Finalmente, desenvolveram-se os métodos de formulação baseados no comportamento das misturas betuminosas. Com base nas propriedades das misturas betuminosas medidas em ensaios de laboratório e a partir de modelos teóricos de previsão de comportamento, estes métodos de formulação procuram prever o comportamento das misturas betuminosas no pavimento e a evolução da degradação do pavimento ao longo dum período de vida seleccionado, para determinados tipos de estrutura do pavimento, de condições ambientais e de tráfego.

Os métodos de formulação mais recentes (relacionados com o comportamento ou baseados no comportamento das misturas betuminosas) 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.

A seguir são descritos os diferentes métodos de formulação existentes, desde os métodos tradicionais e mais utilizados a nível internacional (como os métodos baseados em “receitas” ou especificações e o método empírico de Marshall) até aos métodos mais recentes que continuam a ser aperfeiçoados, experimentados e analisados. No Quadro 2.4, os métodos de formulação de diversos países são incluídos numa determinada categoria, em função dos critérios aos quais estes obedecem, definidos no Quadro 2.3.

Além dos diversos métodos de formulação, existem algumas expressões empíricas desenvolvidas por diversos laboratórios mundiais, que permitem a obtenção do valor aproximado do teor óptimo em betume numa mistura betuminosa. Estas expressões podem ser utilizadas para apoiar a formulação de misturas betuminosas, pois, ao permitirem que a composição inicial a estudar nos métodos de formulação esteja mais próxima da composição óptima, permitem reduzir o custo e o tempo gastos na formulação.

Quadro 2.4 – Métodos de formulação e respectivas categorias
 (adaptado de Luminari and Fidato, 1998)

Países	Categorias de métodos de formulação					
	Tipo "receita"	Empíricos	Análíticos	Volumétricos	Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas	Baseados no comportamento das misturas betuminosas
Austrália				- NARC guide '96 level 1	- NARC guide '96 level 2 & 3	
Bélgica			- CRR R61/87 - CRR 1996			
Finlândia				- ASTO / PANK 95 level 1	- ASTO / PANK 95 level 2 & 3	
França		- Duriez			- AFNOR FN P98, 130,132,134,137, 138,140,141	
Alemanha	- DIN ZTV bit stB94					
Itália		- CNR & AUTOSTRADE				
Suíça		- SN 640-431				
Portugal		- NP 142 & APORBET				
Países Baixos		- RAW Standards			- CROW (draft)	
Reino Unido	- BS 594-4987	- BS 598			- Nottingham University	
E.U.A		- Marshall - Hveem - Hubbard-Field		- SHRP Superpave level 1		- SHRP Superpave level 2 & 3 - SHRP-A-698

Inicialmente, as expressões desenvolvidas baseavam-se no princípio de que o teor óptimo em betume seria o de saturação da mistura betuminosa, ou seja, o betume deveria preencher completamente todos os vazios existentes no esqueleto mineral dos agregados. Observou-se que este princípio não era correcto, visto originar misturas betuminosas com reduzida resistência às deformações permanentes.

Posteriormente, utilizou-se o princípio de que o teor óptimo em betume seria aquele que permitisse cobrir totalmente a superfície dos agregados. Deste modo, seria possível dar à mistura betuminosa suficiente trabalhabilidade e impermeabilidade, tornando assim a mistura betuminosa durável. As fórmulas baseadas na superfície específica dos agregados continuam a ser actualmente as mais utilizadas para determinação analítica do teor óptimo em betume das misturas betuminosas.

Uma das expressões mais utilizadas para o cálculo do teor óptimo em betume foi desenvolvida por Duriez (1950):

$$P_b = \alpha \times K \times \sqrt[5]{\Sigma} \quad (2.2)$$

sendo:

P_b – teor em betume (em relação ao peso do agregado), em percentagem;

$\alpha = \frac{2,65}{\gamma_a}$, sendo γ_a a massa volúmica da mistura de agregados, em g/cm³;

K – módulo de riqueza em betume;

Σ – superfície específica dos agregados, em m²/kg.

O módulo de riqueza em betume tem um valor que varia em função do tipo de mistura betuminosa. Quanto mais rica em betume é a mistura betuminosa, maior será o valor do parâmetro K . Entre os diversos valores recomendados para o módulo de riqueza, apresentam-se os valores indicados em Portugal (APORBET, 1998), que dependem do tipo de camada:

$K = 3,0$ a $3,5$ – misturas betuminosas a frio com características de base;

$K = 3,3$ a $3,8$ – camada de regularização e desgaste.

Actualmente, a Equação 2.2 é utilizada, entre outros países, em França, nas normas AFNOR, para obter o teor mínimo em betume, e, em Portugal, é indicada pela APORBET para obter uma primeira aproximação ao teor óptimo em betume (seguindo-se a utilização do método de formulação de Marshall). A determinação da superfície específica dos agregados pode ser realizada com uma das seguintes equações:

$$\Sigma = \frac{0,25 \times G + 2,3 \times S + 12 \times s + 135 \times f}{100} \quad (2.3)$$

$$\Sigma = \frac{0,17 \times a + 0,33 \times b + 0,71 \times c + 5 \times d + 135 \times e}{100} \quad (2.4)$$

sendo:

G – proporção ponderal de elementos superiores a 6,3 mm;

S – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,315 mm e 6,3 mm;

- s – proporção ponderal de elementos compreendidos entre 0,075 mm e 0,315 mm;
- f – proporção ponderal de elementos inferiores a 0,075 mm;
- a – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #3/8”;
- b – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #4;
- c – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #10;
- d – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #80;
- e – proporção ponderal de elementos passados no peneiro #200.

De seguida, para cada categoria de métodos de formulação, são definidas as suas principais características bem como as vantagens e desvantagens relativamente ao estado actual de conhecimentos.

Métodos tipo “receita”

Os métodos tipo “receita” baseiam-se na utilização de misturas betuminosas tradicionais de composição conhecida que, após longos períodos de tempo de aplicação, para certas condições de tráfego e de clima e materiais, revelaram ter desempenhos satisfatórios.

A mistura betuminosa é definida por uma determinada especificação, tendo em conta a granulometria dos agregados, o tipo e teor em betume, a espessura da camada e as condições de fabrico na central, a colocação e compactação (temperaturas e tipos de compactação). Nestes métodos, não é exigida a preparação de provetes para ensaio ou para análise volumétrica.

Assim, as “receitas” assumem a forma de especificações relativamente rigorosas, no que diz respeito a determinadas características da mistura betuminosa e dos seus componentes.

Este método de formulação continua a ser indicado e aplicado, mesmo nos países onde já se utilizam métodos mais rigorosos, essencialmente em estradas com tráfego pouco intenso.

Métodos empíricos

Os métodos de formulação empíricos fundamentam-se na determinação do teor em betume, de modo a otimizar diversas variáveis determinadas em ensaios (a estabilidade e a

deformação), atendendo aos limites impostos fundamentados na experiência acumulada, incluindo os limites determinados pela análise da porosidade.

Algumas variáveis consistem em parâmetros volumétricos (baridade, porosidade) e outras são obtidas através de ensaios mecânicos empíricos, sobre provetes preparados através dum processo de produção e compactação que não reproduz as condições existentes *in situ*. Através da análise de diversas variáveis (estabilidade, deformação, porosidade, baridade), obtidas em provetes com diferentes teores em betume, procede-se à escolha do teor óptimo em betume, como sendo aquele que otimiza o valor dessas variáveis, podendo recorrer-se à experiência anterior com ensaios semelhantes.

O método de Marshall é o mais conhecido exemplo desta categoria de métodos de formulação, e baseia-se na utilização dum ensaio de compressão diametral ou tracção indirecta, no qual é medida a estabilidade (resistência à deformação) dum provete submetido a um aumento de deformação constante.

Além deste método, existem outros métodos de formulação que se baseiam em ensaios empíricos bastante conhecidos, como os seguintes: o método de Duriez, que utiliza um ensaio de compressão uniaxial desenvolvido em França pelo LCPC (ensaio este que continua a ser utilizado na actual normalização AFNOR); o método Hveem, que utiliza um ensaio triaxial desenvolvido nos Estados Unidos.

Por ser o método de formulação utilizado em Portugal, em seguida, vai descrever-se o método empírico de formulação de Marshall, que também foi utilizado no presente trabalho para determinar a composição inicial das misturas betuminosas em estudo.

O método de formulação de Marshall, que continua a ser utilizado, quer em Portugal, quer no resto do Mundo, foi desenvolvido por Bruce Marshall durante a II Guerra Mundial e foi posteriormente melhorado, após numerosas experiências, pelo *US Army Corps of Engineers*. Este método baseia-se, principalmente, na utilização do ensaio de Marshall, cujos procedimentos estão especificados na norma ASTM D 1559.

O método aplica-se a misturas betuminosas densas utilizadas em qualquer tipo de camada, desde que a dimensão máxima nominal dos agregados seja inferior ou igual a 25 mm.

No método de Marshall é necessário produzir, no mínimo, de 3 provetes (63 mm de altura por 101 mm de diâmetro), para cada teor em betume estudado (no mínimo 5, variando em intervalos de 0,5%) e para cada curva granulométrica considerada. As misturas betuminosas são compactadas com o compactador Marshall, através da aplicação de 35, 50 ou 75 pancadas em cada lado do provete, dependendo da classe de tráfego (ligeiro, médio ou pesado).

Depois dos parâmetros de composição volumétrica (VMA, volume de vazios, baridade máxima teórica, baridade aparente) serem medidos, os provetes são ensaiados à temperatura de 60 °C utilizando o ensaio de Marshall. Neste ensaio, impõe-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) (Figura 2.11).

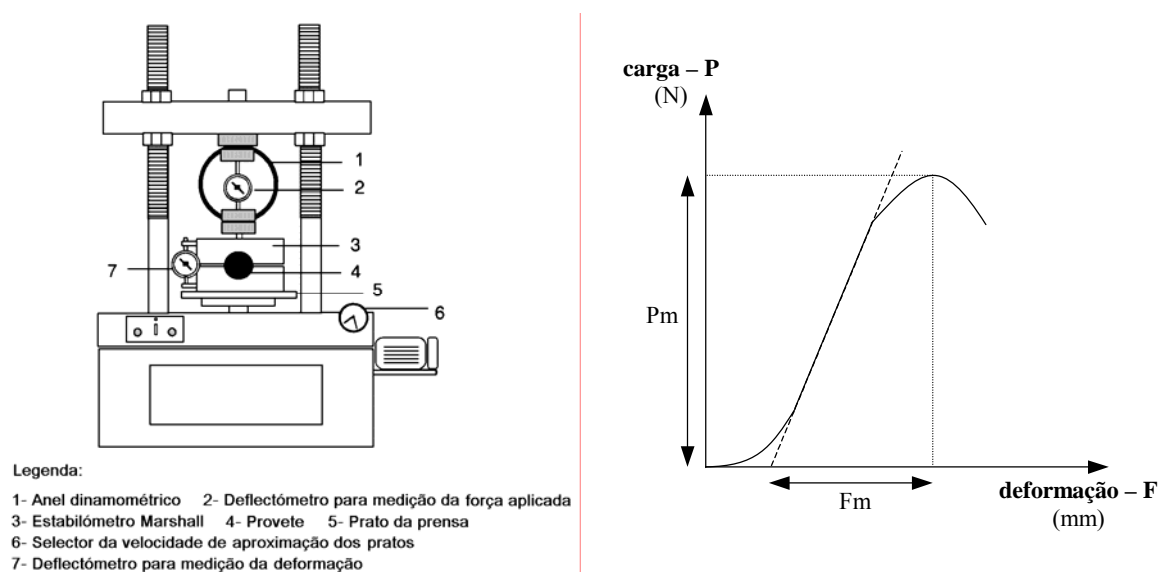


Figura 2.11 – Equipamento utilizado no ensaio de Marshall e esquema do resultado tipicamente obtido (adaptado de Capitão, 1996)

Em seguida, e para cada teor em betume em estudo, determinam-se os valores médios da 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 2.12.

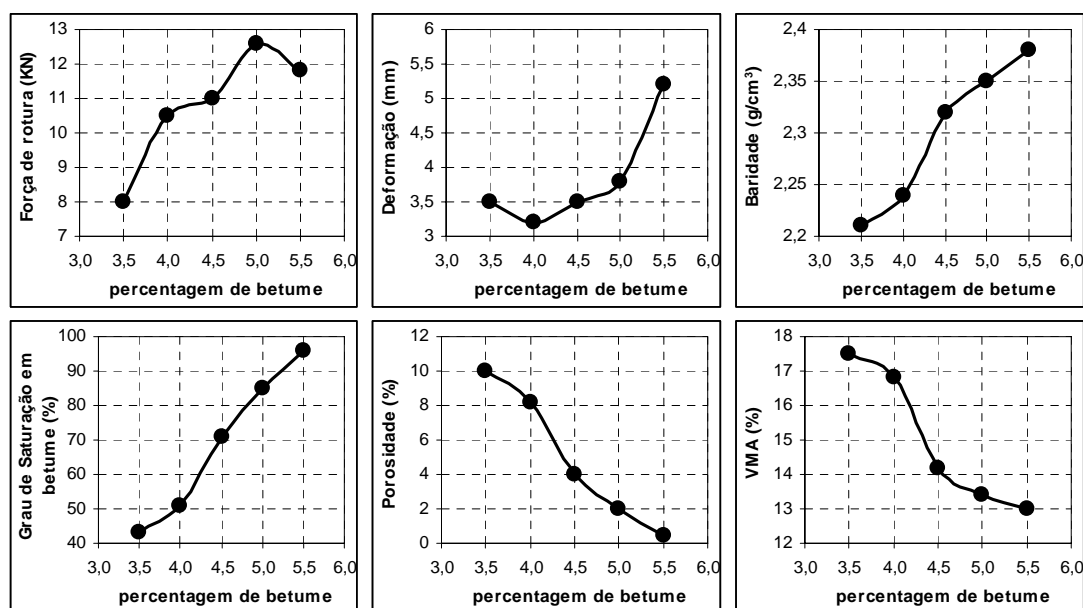


Figura 2.12 – Gráficos dos valores médios obtidos para cada teor em betume, relativos às variáveis estudadas no Método de Marshall (Capitão, 1996)

O teor óptimo em betume é obtido através destes gráficos, sendo igual à média dos teores em betume correspondentes à máxima baridade aparente e à máxima estabilidade. Para esse teor em betume, também é necessário cumprir as exigências especificadas para os restantes parâmetros avaliados na formulação.

Métodos analíticos

O método analítico de formulação permite o cálculo volumétrico da composição da mistura betuminosa (curva granulométrica dos agregados, teor em betume e volume de vazios). A produção de provetes não é obrigatória, embora devam ser preparados e ensaiados provetes, em número reduzido, para confirmar a formulação analítica.

A composição da mistura betuminosa é determinada com base em fórmulas analíticas determinadas a partir das relações volumétricas entre os componentes da mistura. A comparação entre os resultados obtidos analiticamente, em ensaios e *in situ*, demonstrou que este método de formulação utiliza fórmulas analíticas bastante ajustadas à realidade.

A principal vantagem deste método de formulação é a de permitir obter a composição base das misturas betuminosas sem ser obrigatória a produção de provetes. No entanto, embora a

composição de base seja obtida através de fórmulas analíticas, aconselha-se a utilização de um ensaio para a verificação experimental, para que essa composição possa ser considerada como o resultado final do processo de formulação.

O primeiro método analítico de formulação foi desenvolvido na Bélgica, e foi apresentado no “*Code de Bonne Pratique*” do CRR (1987), que aplica o programa informático PRADO para determinação analítica da composição base das misturas betuminosas.

O primeiro método de formulação analítico belga aconselhava a utilização de um único ensaio, empírico, para verificar a composição de base, enquanto que o novo método de formulação (CRR, 1996) permite a utilização de ensaios empíricos ou de ensaios fundamentais, relacionados com o comportamento das misturas betuminosas, em função do tipo de mistura betuminosa a formular.

Métodos volumétricos

Nos métodos volumétricos, a composição das misturas betuminosas é determinada através da análise das proporções volumétricas dos vazios, do betume e dos agregados de misturas betuminosas compactadas, usando um equipamento de ensaio que reproduz, em laboratório, o processo de compactação *in situ*: o Compactador de Corte Giratório (CCG). A comparação entre as propriedades das misturas betuminosas compactadas no CCG e aquelas encontradas em misturas retiradas de pavimentos em serviço confirmou que este equipamento reproduz adequadamente a compactação *in situ* (Cominsky et al., 1994).

A composição da mistura betuminosa é obtida com base nas propriedades volumétricas medidas em provetes compactados em laboratório, semelhantes àquelas obtidas para as misturas betuminosas *in situ*, que devem cumprir determinadas exigências especificadas. A principal exigência é a obtenção duma porosidade igual a 4%. As propriedades volumétricas são o volume de vazios dos agregados (VMA), o volume de vazios da mistura betuminosa (V_v) e o volume de vazios preenchidos por betume (VPB).

Os métodos de formulação 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.

Os métodos volumétricos estão na base dos mais recentes métodos de formulação relacionados com o comportamento ou baseados no comportamento das misturas betuminosas.

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 (fundamentais ou de simulação), da composição que garante determinado nível de comportamento desejado para a mistura betuminosa. Por exemplo, se o comportamento que se espera dum mistura betuminosa é uma boa resistência à fadiga, procura-se obter, através de ensaios, uma composição que garanta que as exigências relativas a esse comportamento da mistura betuminosa sejam alcançadas.

Nos métodos de formulação relacionados com o comportamento das misturas betuminosas, produzem-se inicialmente misturas betuminosas baseadas na composição volumétrica ótima. Em seguida, estas são ensaiadas através de ensaios fundamentais ou de simulação, que avaliam certas propriedades relacionadas com o comportamento da mistura betuminosa no pavimento. A partir dos resultados destes ensaios, será encontrada a composição ótima da mistura betuminosa: aquela que garante que todas as propriedades de comportamento avaliadas serão superiores a um mínimo desejado ou especificado.

Métodos baseados no 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 fundamentais ou de simulação, baseados no comportamento das misturas betuminosas em serviço, cujos resultados servem como dados de entrada num sistema informático de avaliação integrado.

O sistema informático de avaliação integrado é um programa que utiliza um conjunto de modelos matemáticos interligados para prever o comportamento das misturas betuminosas *in situ* ao longo do tempo e em condições reais de serviço. Nestes sistemas, há uma interacção entre a formulação das misturas e o dimensionamento do pavimento onde estas são utilizadas. Os resultados obtidos a partir do sistema informático permitem concluir se a mistura betuminosa em estudo deve ser aceite ou rejeitada.

Os provetes usados nos ensaios são compactados empregando procedimentos que permitem representar correctamente a compactação *in situ*. Segundo as indicações de Harrigan et al. (1994), esses procedimentos consistem na utilização do CCG ou do cilindro de rastos lisos.

Os ensaios a realizar para formulação devem permitir obter as propriedades fundamentais das misturas betuminosas e devem simular o seu comportamento no pavimento. As propriedades fundamentais são usadas como dados de entrada num modelo matemático para previsão do comportamento das misturas betuminosas, modelo esse que faz parte dum sistema informático de avaliação integrado.

No sistema informático de avaliação integrado, são aplicados os seguintes modelos matemáticos para previsão do comportamento das misturas betuminosas: i) propriedades das misturas; ii) efeitos climáticos; iii) resposta do pavimento; iv) degradação do pavimento. Com base nestes modelos e a partir dos dados de projecto (estrutura do pavimento, tráfego e clima) e dos 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-698 (Sousa et al., 1994).

Vantagens e desvantagens de cada método de formulação

Cada método de formulação deve ser utilizado criteriosamente, em função: i) da normalização existente a nível nacional; ii) da importância da obra a realizar; iii) da experiência do responsável pela formulação; iv) dos equipamentos disponíveis para executar os ensaios.

Para uma escolha mais adequada do método de formulação a utilizar em cada caso, é fundamental conhecer as vantagens e desvantagens de cada categoria, onde foram agrupados os métodos de formulação. Assim, no Quadro 2.5 resumem-se as principais vantagens e desvantagens associadas a cada uma das categorias de métodos de formulação apresentadas.

Quadro 2.5 – Vantagens e desvantagens da cada categoria de métodos de formulação

Métodos de formulação	Vantagens	Desvantagens
Tipo “receita”	<ul style="list-style-type: none"> - facilidade de aplicação; - grande experiência na sua utilização; - baseados em “receitas” que demonstraram um bom comportamento <i>in situ</i>; - 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.
Empíricos	<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 definir 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; - não se aplicam a misturas abertas ou descontínuas; - estados de tensão instalada no provete mal definidos.
Analíticos	<ul style="list-style-type: none"> - estimam as propriedades das misturas betuminosas através de cálculos analíticos; - determinam o teor em masticos 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.
Volumétricos	<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; - o CCG consegue simular adequadamente, em laboratório, a compactação <i>in situ</i>. 	<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 trabalhabilidade e a resistência às deformações permanentes da mistura; - pequenas alterações nos parâmetros do CCG podem originar uma grande diferença de resultados; - não se assegura um bom comportamento das misturas betuminosas apenas através deste método.
Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas	<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, <i>in situ</i>; - 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 necessário para a realização dos ensaios são elevados; - ensaios realizados em poucos laboratórios; - utilização num reduzido número de pavimentos.
Baseados no comportamento das misturas betuminosas	<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 <i>in situ</i> 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 a sua eficácia.

Em princípio, deve utilizar-se um método de formulação que conduza à obtenção de uma mistura betuminosa com um comportamento otimizado em relação a determinadas características, escolhidas com base nas principais funções que a mistura desempenhará no pavimento.

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), sem estar comprometido o desempenho da mistura betuminosa no pavimento.

A nível económico, deve colocar-se a questão se o investimento inicial na formulação compensa as suas vantagens, nomeadamente:

- um melhor conhecimento de algumas das suas características (resistência à fadiga e às deformações permanentes, e módulo de rigidez), para permitir um melhor e mais correcto dimensionamento do pavimento;
- uma melhoria no desempenho da mistura betuminosa.

2.4. Condições para Realização dos Ensaios de Caracterização das Misturas Betuminosas

Os métodos de formulação de misturas betuminosas baseiam-se, normalmente, na utilização de ensaios que determinam o comportamento das misturas betuminosas em serviço.

Quando se avaliam as propriedades mecânicas das misturas betuminosas relacionadas com o seu comportamento, recorrendo à utilização de ensaios fundamentais e de simulação, determina-se, habitualmente, o módulo de rigidez, a resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência às deformações permanentes.

Pela importância que os ensaios fundamentais e de simulação têm na formulação de misturas betuminosas e na avaliação das propriedades das misturas betuminosas relacionadas com o seu comportamento em serviço, neste trabalho são apresentadas as considerações mais relevantes sobre as condições a observar para realização desses ensaios.

Os ensaios devem representar o estado de tensão e deformação a que estão submetidas as misturas betuminosas *in situ*, durante a passagem repetida do tráfego e sob a acção dos agentes climáticos.

Outros factores, como os tempos de repouso e carregamento e o grau de compactação da mistura betuminosa, também devem ser representativos das condições existentes no pavimento.

No entanto, as condições *in situ* alteram-se continuamente e, por esse motivo, é difícil seleccionar a forma como devem ser realizados os ensaios mecânicos para avaliação do comportamento das misturas betuminosas. O estado de tensão a que as misturas betuminosas estão sujeitas *in situ*, apenas pode ser representado adoptando várias simplificações.

Na Figura 2.13 pode observar-se uma representação simplificada dum elemento de pavimento, para o qual se assinalam as tensões que ocorrem durante a passagem da roda de um veículo. Na prática, também ocorrem tensões axiais e de corte perpendicularmente a este plano (num elemento volumétrico).

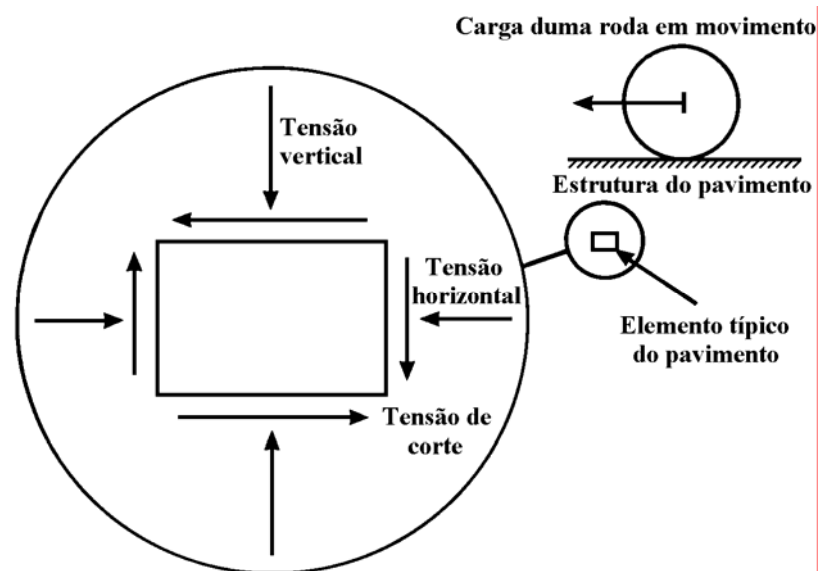


Figura 2.13 – Representação esquemática das tensões que ocorrem num elemento do pavimento durante a passagem da roda de um veículo (Whiteoak, 1990)

O estado de tensão que ocorre num elemento do pavimento altera-se ao longo do tempo, durante cada passagem do rodado dum veículo, conforme se pode observar na Figura 2.14.

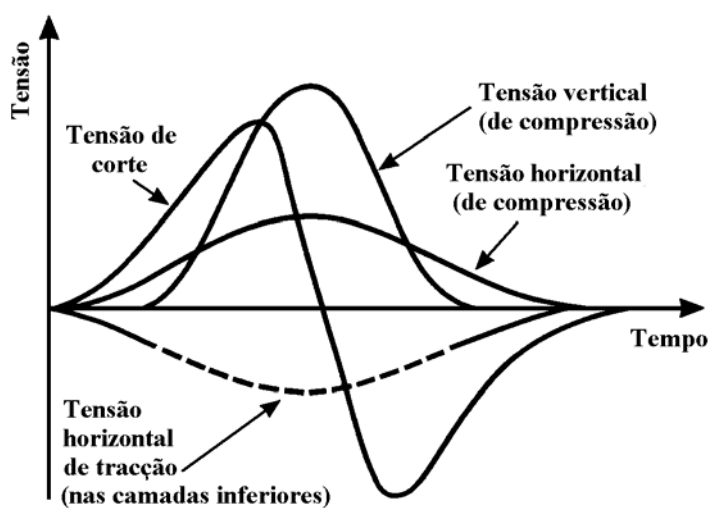


Figura 2.14 – Tensões induzidas pela passagem da roda de um veículo ao longo do tempo
(Whiteoak, 1990)

Whiteoak (1990) refere que o ensaio triaxial cíclico é aquele que mais aproximadamente consegue reproduzir este estado de tensão complexo no pavimento, embora não consiga reproduzir o efeito de reversão da tensão de corte.

Na prática procura simplificar-se as condições existentes *in situ*, considerando-se apenas aquelas que são preponderantes no desempenho das misturas betuminosas e do pavimento para cada característica de comportamento que se pretende estudar em laboratório, nomeadamente:

- o fendilhamento por fadiga é originado, essencialmente, por tensões de tracção horizontais repetidas que resultam da flexão do pavimento devido à passagem do tráfego, essencialmente a temperaturas médias (normalmente inferior a 25 °C);
- as deformações permanentes resultam duma diminuição de volume, originada por compressão vertical, e duma deformação plástica, causada por esforços de corte que ocorrem nas extremidades das rodas dos veículos, essencialmente a temperaturas elevadas (normalmente acima dos 50 °C).

2.5. Características de Rigidez das Misturas Betuminosas

Nos métodos mecanicistas utilizados para dimensionamento dum pavimento, as misturas betuminosas são caracterizadas, essencialmente, pelo seu módulo de rigidez e coeficiente de

Poisson. Dado o comportamento viscoelástico das misturas betuminosas, é importante ainda o conhecimento do ângulo de fase.

A rigidez de uma mistura betuminosa depende da temperatura e do tempo de carregamento, estando este relacionado com a velocidade de circulação dos veículos pesados.

A rigidez é mais elevada quando se está na presença de baixas temperaturas e curtos tempos de carregamento, quando o comportamento da mistura é essencialmente elástico. Esta rigidez é utilizada na caracterização da mistura betuminosa para dimensionamento.

Por outro lado, a rigidez é mais reduzida para altas temperaturas e longos tempos de carregamento, quando o comportamento da mistura é essencialmente viscoso. Esta rigidez é fundamental para a previsão das deformações permanentes.

A rigidez de uma mistura betuminosa, quando o seu comportamento é essencialmente elástico, depende da rigidez elástica do betume e da composição volumétrica da mistura betuminosa.

O conhecimento da rigidez das misturas betuminosas é importante para a determinação da capacidade resistente dos pavimentos, bem como para a análise da resposta do pavimento às cargas dos veículos.

O coeficiente de Poisson é importante para a análise estrutural de um pavimento pelo que é necessário o seu conhecimento. No entanto esta importância é muito reduzida quando comparada com a importância que o módulo de rigidez assume na análise dos pavimentos. Nas misturas betuminosas o coeficiente de Poisson é independente do tipo de carregamento variando apenas com a temperatura. O valor do coeficiente de Poisson varia entre 0,35 para baixas temperaturas e 0,50 para altas temperaturas, pelo que a utilização de um valor intermédio será o procedimento mais adequado.

As misturas betuminosas apresentam um comportamento viscoelástico, que é avaliado em ensaios cíclicos com um carregamento sinusoidal da seguinte forma:

$$\sigma = \sigma_0 \times \sin(w \times t) \quad (2.5)$$

A resposta do material à solicitação aplicada resulta numa deformação que segue uma lei caracterizada pela mesma frequência, mas apresentando um desfasamento em relação à carga, de acordo com a Equação 2.6. A este desfasamento é atribuído o nome de ângulo de fase (φ).

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \times \sin(\omega \times t - \varphi) \quad (2.6)$$

O quociente entre a tensão aplicada e a extensão produzida define o módulo complexo da mistura betuminosa de acordo com a Equação 2.7:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \times (\cos \varphi + i \times \sin \varphi) = |E^*| \times (\cos \varphi + i \times \sin \varphi) \quad (2.7)$$

O módulo complexo é caracterizado por duas componentes: uma componente real (E_1), que representa a energia armazenada no material, e uma componente imaginária (E_2), que representa a energia perdida por atrito interno no seio do material. Estas componentes são expressas por:

$$E_1 = |E^*| \times \cos \varphi \quad (2.8)$$

$$E_2 = |E^*| \times \sin \varphi \quad (2.9)$$

O módulo complexo pode também ser apresentado pelo seu valor em módulo ($|E^*|$), habitualmente designado de módulo de rigidez, e pelo seu ângulo de fase (φ), respectivamente de acordo com as Equações 2.10 e 2.11.

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \quad (2.10)$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{E_2}{E_1}\right) \quad (2.11)$$

Esta é a forma mais corrente de apresentação das propriedades mecânicas de uma mistura betuminosa, considerando uma dada temperatura e uma determinada frequência de aplicação das cargas.

Quando se realizam ensaios de corte repetido para determinação do módulo, obtém-se o módulo de corte complexo G^* .

Assumindo um comportamento linear viscoelástico e isotrópico, e tendo em consideração que a componente imaginária do coeficiente de Poisson é praticamente nula (Charif, 1991; Doubbaneh, 1995), pode relacionar-se o módulo complexo normal (E^*) com o módulo complexo de corte (G^*) da seguinte forma:

$$G^* = \frac{E^*}{2 \times (1 + \nu)} \quad (2.12)$$

Os resultados do módulo de rigidez e do ângulo de fase podem ser apresentados graficamente, recorrendo a curvas de igual temperatura ou de igual frequência, tanto para o módulo de rigidez como para o ângulo de fase. Outra forma de apresentação gráfica dos resultados é através da curva mestra para uma determinada temperatura de referência.

As curvas mestras (Figura 2.15) são obtidas pela translação das curvas “módulo-frequência” de diversas temperaturas, para uma mesma curva, sendo a translação realizada pela aplicação de um factor de escala $\log(\alpha_T)$, função da temperatura. A fórmula geralmente utilizada para definição do factor de translação baseia-se na equação de Arrhenius, dada por:

$$\log(\alpha_T) = \frac{\Delta H}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_S} \right) \quad (2.13)$$

sendo:

ΔH = energia de activação aparente característica do material;

R = constante do gás universal (8,314 J/mole/°K);

T = temperatura de ensaio expressa em °K;

T_S = temperatura de referência expressa em °K.

Esta transformação de escalas permite que as variáveis temperatura e frequência sejam combinadas numa nova variável, denominada de frequência equivalente, que é dada por:

$$f_{Equivalente} = f \times \alpha_T = f \times 10^{\frac{\Delta H}{R} \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_S} \right)} \quad (2.14)$$

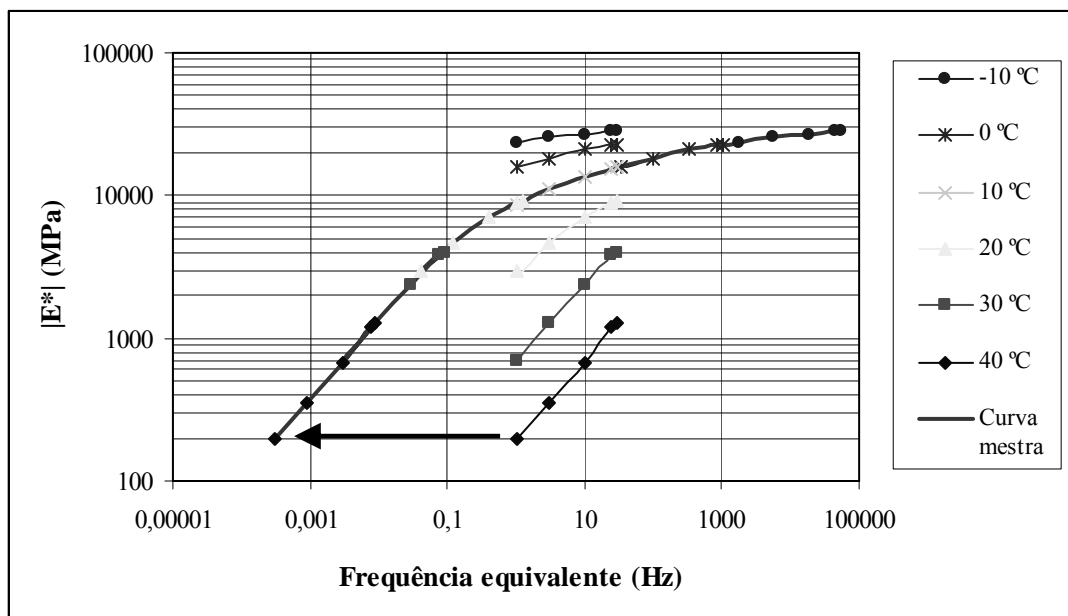


Figura 2.15 – Curva mestra para uma temperatura de referência de 10 °C
(adaptado de Di Benedetto and De La Roche, 1998)

A vantagem desta curva resulta de permitir, por interpolação, obter o valor do módulo de rigidez de uma mistura betuminosa para qualquer combinação de temperatura e frequência dentro da gama dos valores medidos.

Outras formas de apresentar os resultados relativos ao módulo de rigidez de uma mistura betuminosa são a sua representação no *Black Space* e no plano Cole Cole (Di Benedetto and De La Roche, 1998). A representação no *Black Space* apresenta a relação entre o módulo de rigidez e o ângulo de fase, permitindo a obtenção da componente puramente elástica do módulo de rigidez (E_∞). A representação no plano Cole e Cole apresenta a relação entre as componentes real e imaginária do módulo de rigidez.

Ensaios utilizados para determinação do módulo de rigidez

A determinação do módulo de rigidez complexo é realizada através de ensaios repetidos, habitualmente utilizados para a determinação das características de fadiga ou de deformações permanentes das misturas betuminosas. Assim, o módulo complexo pode ser determinado através dos seguintes ensaios:

- ensaios de tracção ou compressão uniaxial (com ou sem confinamento) (E^*);
- ensaios de corte (G^*);

- ensaios de flexão (E^*);
- ensaios de tracção indirecta (E^*).

Tayebali et al. (1994) realizaram ensaios para a avaliação da rigidez das misturas betuminosas, utilizando ensaios de flexão, axiais e de tracção indirecta, concluindo que a rigidez obtida com ensaios de tracção indirecta assume valores superiores à rigidez obtida com ensaios de flexão e axiais. Este facto pode dever-se à necessidade de arbitrar um valor para o coeficiente de Poisson, quando se calcula o módulo de rigidez utilizando ensaios de tracção indirecta.

O mesmo autor também relacionou o módulo $|G^*|$, obtido em ensaios de corte com altura constante, com o módulo $|E^*|$, obtidos em flexão em quatro pontos, tendo chegado à seguinte relação estatística:

$$|E^*| = 8,650 \times |G^*|^{0,913} \quad (2.15)$$

Por outro lado, a Equação 2.12 (aplicável no contexto do comportamento isotrópico, viscoelástico e linear das misturas betuminosas) implica que o valor do módulo $|E^*|$ seja 2 a 3 vezes superior ao valor do módulo $|G^*|$. De acordo com Di Benedetto and De La Roche (1998), as diferentes relações obtidas entre os resultados em flexão e em corte tem levado a questionar as medições efectuadas nos ensaios de corte, dado que os resultados em flexão são muito consistentes.

2.6. Características de Fadiga das Misturas Betuminosas

Os pavimentos estão sujeitos a um estado de tensão repetida, provocado pela aplicação das cargas dos veículos, que se caracteriza pela fadiga das misturas betuminosas. Para se caracterizar a resistência à fadiga numa mistura betuminosa, é necessário avaliar esse comportamento sob um estado de tensão semelhante ao encontrado *in situ*. Existem vários métodos para determinação da resistência à fadiga, que simulam as condições existentes *in situ*. Estes métodos envolvem uma variedade de técnicas de ensaio, tipos de equipamentos, configuração, tipo e modo de carregamento, condições de ensaio e procedimentos de análise.

A ruína de uma mistura betuminosa por fadiga ocorre sob a acção de cargas repetidas, quando o valor máximo da tensão instalada em cada aplicação de carga inferior à tensão de rotura da mistura betuminosa para um único carregamento. Este tipo de ruína manifesta-se pelo aparecimento de fendas na zona de passagem dos rodados dos veículos e, habitualmente, propagam-se desde a parte inferior das camadas betuminosas até à superfície.

As fendas que aparecem à superfície do pavimento evoluem de fendas longitudinais isoladas para fendas ramificadas, até ao aparecimento do fendilhamento constituído pela “pele de crocodilo”, tal como ilustrado na Figura 2.16.

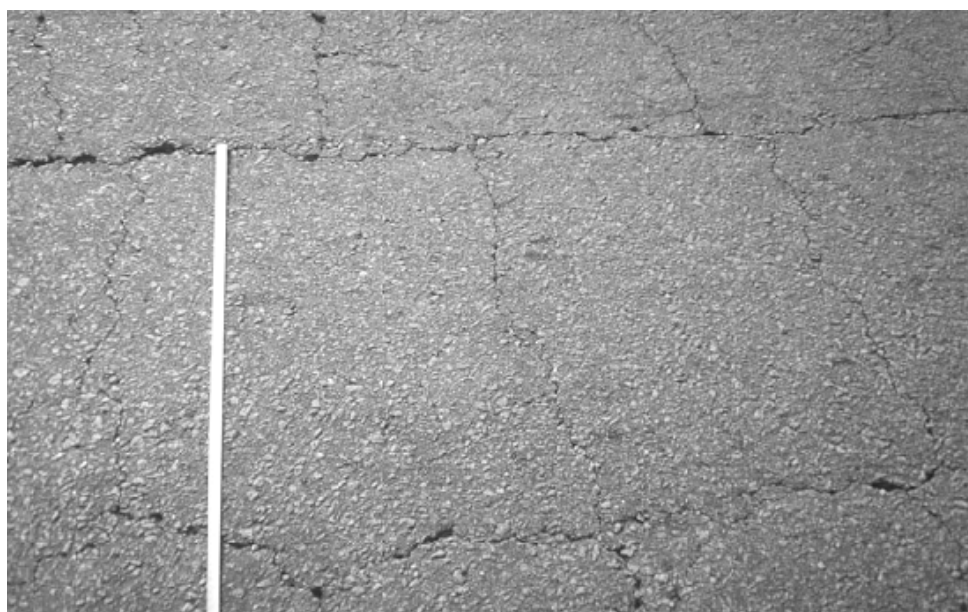


Figura 2.16 – Fendilhamento tipo “pele de crocodilo” num pavimento

Para dimensionamento dos pavimentos, a resistência à fadiga duma mistura betuminosa é calculada com expressões que relacionam a resistência à fadiga esperada com o nível de solicitação do pavimento e com determinadas características intrínsecas da mistura betuminosa (normalmente a quantidade de betume e o módulo de rigidez). Estas expressões foram obtidas com base nos resultados de uma grande quantidade de ensaios laboratoriais realizados em misturas betuminosas com composições diversas, solicitadas de diferentes modos.

A aplicação destas expressões deve ser efectuada com reserva, dado que se está a avaliar misturas betuminosas, provavelmente, bastante diferentes das que conduziram à obtenção de tais expressões.

Deste modo, conclui-se que a avaliação da resistência à fadiga de uma mistura betuminosa, necessária ao dimensionamento de pavimentos, deve ser realizada utilizando ensaios mecânicos efectuados sobre a mesma, que devem reproduzir o melhor possível as condições a que a mistura betuminosa está submetida *in situ*.

Relativamente aos ensaios de fadiga, a maior parte dos resultados existentes foram obtidos em ensaios de flexão simples. Nesses ensaios as tensões ou extensões são aplicadas repetitivamente até o provete atingir a rotura, ou até que este exiba alterações nas suas características que tornem a mistura betuminosa inadequada. Os resultados destes ensaios são expressos na forma da Equação 2.16, proposta por Monismith et al. (1985):

$$N_f = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^b \times \left(\frac{1}{E}\right)^c \quad (2.16)$$

sendo:

ε = extensão aplicada;

a, b, c = coeficientes função do material e associados ao ensaio respectivo;

N_f = número aplicações de carga que conduz à rotura do provete;

E = módulo de rigidez.

O estudo laboratorial da resistência à fadiga deve obedecer a várias hipóteses de ensaio. De um modo geral, estas hipóteses descrevem o comportamento à fadiga das misturas betuminosas ensaiadas em laboratório. De acordo com Tayebali et al. (1994), as hipóteses iniciais para estudo da resistência à fadiga devem ser as indicadas em seguida.

- O fendilhamento por fadiga é causado pela aplicação repetida das cargas dos veículos. Nos pavimentos flexíveis, a fadiga resulta, principalmente, da tensão horizontal de tracção na base das camadas betuminosas. A tensão de tracção principal máxima é considerada a determinante no fendilhamento por fadiga.
- Para análise da fadiga, o estado crítico de tensão ou extensão na estrutura do pavimento pode ser estimado com suficiente aproximação usando a teoria linear da elasticidade, na qual o comportamento mecânico das misturas betuminosas é caracterizado pelo seu módulo de rigidez e coeficiente de Poisson.
- Os ensaios devem ser realizados, se possível, até à rotura do provete de mistura betuminosa, de modo a obter um valor mais exacto para a resistência à fadiga.

- Nos ensaios laboratoriais de fadiga é preferível a utilização de cargas pulsatórias em vez de cargas sinusoidais, porque os períodos de descanso permitem a relaxação da mistura betuminosa, tal como acontece nas misturas betuminosas utilizadas *in situ*.
- Embora os pavimentos tenham de resistir à fadiga em resposta à flexão repetida a que estão sujeitos, a fadiga é basicamente um fenómeno de tracção, e os ensaios sobre provetes podem ser realizados em tracção ou em flexão (isto significa que se podem relacionar resultados de ensaios de flexão com resultados de ensaios de tracção).
- O modo de carregamento é um factor crítico na análise do fendilhamento das misturas betuminosas, uma vez que as misturas apresentam diferentes comportamentos conforme os ensaios sejam realizados com tensão controlada ou com extensão controlada. O efeito do modo de carregamento faz-se sentir mais na propagação das fendas do que no tempo de início de fendilhamento.
- Os ensaios de fadiga acelerados pela aplicação de elevados níveis de tensão ou extensão podem ser utilizados, com resultados aceitáveis, para a análise das misturas betuminosas.
- Em carregamento simples, o início de fendilhamento numa mistura betuminosa relaciona-se com o nível de tensão ou extensão pelas seguintes expressões:

$$N_f = a \times \left(\frac{1}{\varepsilon} \right)^b \quad (2.17)$$

$$N_f = b \times \left(\frac{1}{\sigma} \right)^d \quad (2.18)$$

sendo:

N_f = número de aplicações de carga até ao início do fendilhamento;

ε, σ = extensão e tensão de tracção;

a, b, c, d = coeficientes determinados experimentalmente.

- Em carregamento composto ou misto, devido, por exemplo, a vários níveis de tensão ou extensão e/ou temperaturas, o fendilhamento de uma mistura betuminosa inicia-se quando se verifica a lei de Miner:

$$\sum_i \left(\frac{n_i}{N_i} \right) = 1 \quad (2.19)$$

sendo:

n_i = número de aplicações de tensão σ_i , ou extensão ε_i ;

N_i = número de aplicações até à rotura de tensão σ_i , ou extensão ε_i .

Os ensaios de fadiga devem ser realizados de modo a não haver acumulação de deformação permanente. Apesar deste fenómeno se verificar nas misturas betuminosas, em simultâneo com o fendilhamento por fadiga, ele deve ser evitado durante os ensaios por dificultar a análise dos resultados.

Ensaaios utilizados para determinação da resistência à fadiga

Os ensaios mais utilizados para avaliação da resistência das misturas betuminosas ao fendilhamento por fadiga são os seguintes:

- flexão simples, numa das seguintes configurações de ensaio:
 - 1) sujeitando vigas simplesmente apoiadas a cargas pulsatórias ou sinusoidais, com carregamento central em um ou em dois pontos;
 - 2) submetendo vigas em consola, de forma trapezoidal ou cilíndrica, a carregamento sinusoidal na sua extremidade livre;
- 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, utilizando os princípios da mecânica da fractura para prever a vida à fadiga;
- ensaios de torção em consola com cargas pulsatórias ou sinusoidais;
- ensaios com o equipamento *wheel-tracking* (carga rolante repetida);
- ensaios à escala real, em troços experimentais de pavimentos reais sujeitos a tráfego controlado, ou em pistas laboratoriais lineares ou circulares.

A maioria dos métodos utilizados para previsão do comportamento das misturas betuminosas à fadiga foi desenvolvida a partir de ensaios à flexão simples, nos quais uma dada tensão ou

extensão é repetidamente aplicada até à convencional ruína do provete, ou até à mistura betuminosa exibir mudanças nas suas propriedades mecânicas que se traduzam num comportamento inadequado.

Habitualmente, o critério convencional para definição da resistência à fadiga duma mistura betuminosa é a redução do seu módulo de rigidez para metade do seu valor inicial. Assim, nos ensaios com tensão imposta, o valor da extensão irá duplicar, enquanto nos ensaios com extensão imposta, o valor da tensão irá reduzir-se para metade do seu valor inicial.

Para determinar a resistência à fadiga das misturas betuminosas foram desenvolvidos vários tipos de equipamentos, que realizam diferentes tipos de ensaios de flexão simples. Entre esses ensaios, o mais utilizado actualmente, e o que apresenta maiores vantagens perante os restantes ensaios existentes, consiste em submeter vigas simplesmente apoiadas a cargas repetidas, com carregamento central em dois pontos. Nesse tipo de ensaio de flexão as cargas são aplicadas ao provete em quatro pontos, dois de apoio (reacções) e dois de carregamento (acções), assegurando a existência duma zona central de momento máximo constante sem esforço transversal. A rotura do provete desenvolve-se sempre nessa zona de momento constante, o que garante uma menor dispersão dos resultados.

Relativamente às cargas repetidas, estas podem ser aplicadas aos provetes com uma variação sinusoidal no tempo ou com outro tipo de impulso, mantendo-se constante a tensão ou a extensão imposta.

No caso dos ensaios com tensão imposta, a amplitude da carga (ou tensão) vai ser constante nas várias aplicações de carga (ensaio conduzido com controlo da carga), pelo que a deformação do provete vai aumentando à medida que a rigidez da mistura betuminosa diminui. Nos ensaios com extensão imposta, a amplitude da deformação (ou extensão) é constante para as várias aplicações de carga (ensaio conduzido com controlo de deformação), pelo que a tensão no provete diminui à medida que a rigidez da mistura betuminosa diminui.

Nos ensaios com tensão imposta a dispersão dos resultados é menor e a rotura do provete é bem definida. Os ensaios com extensão imposta são menos sensíveis ao tipo de carregamento (impulso de carga), e representam melhor a propagação de fendas que ocorre num pavimento. A vida à fadiga obtida nos ensaios com tensão imposta é geralmente menor do que a determinada nos ensaios com extensão imposta.

2.7. Características de Resistência às Deformações Permanentes das Misturas Betuminosas

As deformações permanentes das misturas betuminosas desenvolvem-se gradualmente com a repetição de aplicações de carga, podendo manifestar-se por depressões longitudinais nos locais de passagem dos rodados dos veículos pesados (rodeiras), eventualmente acompanhadas por elevações laterais, tal como se pode observar na Figura 2.17, em particular no caso de elevada profundidade de rodeira.

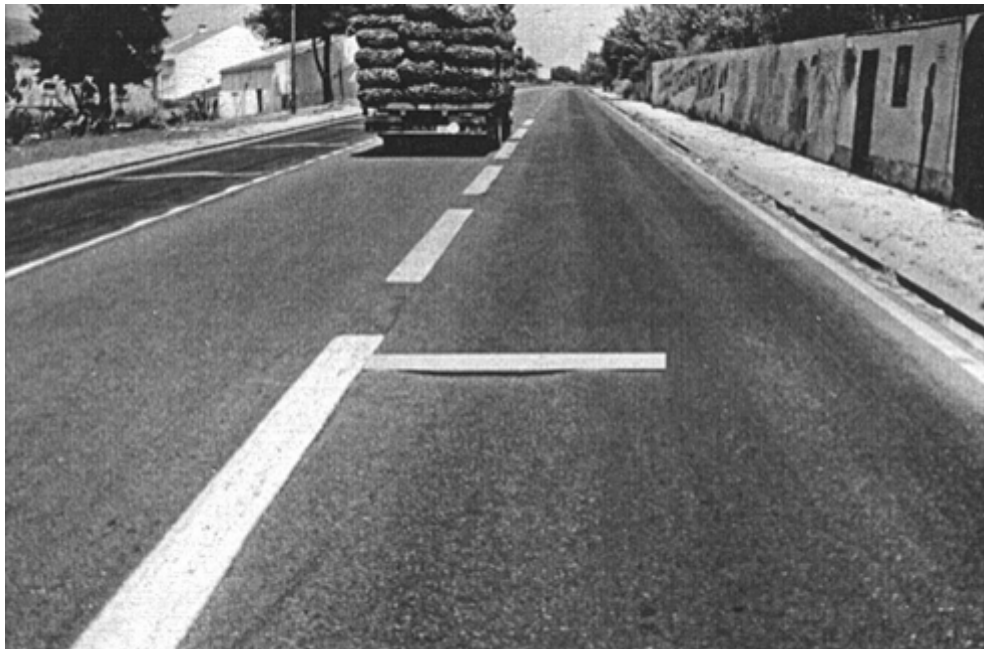


Figura 2.17 – Deformações permanentes tipo rodeira num pavimento

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 solicitação do tráfego pesado, origina deformações permanentes no pavimento, que podem ser avaliadas recorrendo à utilização de ensaios mecânicos de fluência e de compressão simples.

De acordo com Sousa (1994), após esta densificação inicial, a mistura betuminosa sofre deformações permanentes devido a esforços de corte que ocorrem perto da superfície do pavimento, na zona que limita a área de contacto entre o pneu e o pavimento. Estes esforços

desenvolvem-se sem que a mistura betuminosa sofra variações de volume e são os principais mecanismos de formação de rodeiras ao longo do período de vida do pavimento.

Ensaios utilizados para determinação da resistência às deformações permanentes

Os ensaios utilizados para caracterizar o comportamento das misturas betuminosas quanto à sua resistência às deformações permanentes são os seguintes:

- ensaios de compressão simples, com aplicação de cargas estáticas, ou repetidas;
- ensaios de compressão triaxial, com aplicação de cargas estáticas, ou repetidas;
- ensaios de corte, com aplicação de cargas estáticas, ou repetidas;
- ensaios de cargas rolantes repetidas, cujo exemplo é o ensaio com o equipamento *wheel-tracking*, realizados sobre lajes de mistura betuminosa;
- ensaios à escala real, em troços experimentais de pavimentos reais sujeitos a tráfego controlado, ou em pistas laboratoriais lineares ou circulares.

Entre os diversos tipos de ensaio, o ensaio de corte pode reproduzir com uma certa simplicidade as condições existentes *in situ*, que ocorrem principalmente junto à superfície de um pavimento, e que originam deformações permanentes. Este ensaio tem sido pouco utilizado para avaliação do comportamento das misturas betuminosas, parecendo ser, no entanto, adequado para estudos no domínio das deformações permanentes, uma vez que os cavados de rodeiras são causados principalmente por deformações plásticas de corte (Sousa et al., 1994).

2.8. Factores que Influenciam o Comportamento das Misturas Betuminosas

Os factores que influenciam o comportamento das misturas betuminosas podem ser divididos em duas categorias:

- factores relacionados com as condições de ensaio (frequência de aplicação da carga, temperatura, nível de carregamento, tipo de ensaio);
- factores relacionados com a composição da mistura betuminosa.

Os principais factores que influenciam o valor do módulo de rigidez das misturas betuminosas são a frequência de aplicação de cargas e a temperatura. O módulo de rigidez aumenta quando

a frequência aumenta e quando a temperatura diminui. Relativamente ao nível de carregamento, o módulo deve ser determinado com um nível de extensão para o qual a mistura betuminosa exibe um comportamento linear. Pais (1999) refere, no seu trabalho, que o módulo de rigidez diminui com o aumento do nível de extensão aplicado.

A composição das misturas betuminosas também influencia o valor do módulo de rigidez, da seguinte forma:

- o módulo de rigidez aumenta quando se utilizam betumes mais duros;
- o aumento do teor de betume e da quantidade de filer (melhoria da qualidade do mastique) implica um acréscimo do módulo até determinado valor limite, a partir do qual o módulo começa a diminuir;
- a granulometria têm pouca influência no valor da rigidez das misturas betuminosas a temperaturas baixas (quando a rigidez do betume é elevada), passando a ter uma maior influência quando a temperatura aumenta;
- a diminuição do volume de vazios também origina um aumento do módulo de rigidez das misturas betuminosas.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas, avaliada em ensaios laboratoriais, depende principalmente do modo de carregamento (tensão ou extensão controlada) e, dependendo da temperatura, os resultados destes ensaios podem ser completamente diferentes.

Tayebali et al. (1993) resumem, no Quadro 2.6, os principais factores que a influenciam a resistência à fadiga das misturas betuminosas, assim como os efeitos da variação desses factores.

Quadro 2.6 – Efeito da variação de alguns factores no comportamento à fadiga de misturas betuminosas (Tayebali et al., 1993)

Factor	Evolução do factor	Efeito da evolução do factor	
		Resistência à fadiga avaliada em ensaios com tensão imposta	Resistência à fadiga avaliada em ensaios com extensão imposta
Viscosidade do betume	Aumento	Melhora	Prejudica
Teor em betume	Aumento	Melhora	Melhora
Granulometria do agregado	Aberta para fechada	Melhora	Prejudica
Porosidade	Redução	Melhora	Melhora
Temperatura	Redução	Melhora	Prejudica

Relativamente à composição da mistura betuminosa, os principais factores que afectam a resistência à fadiga são o teor em betume e a porosidade. O tipo de agregado tem menor influencia comparativamente às outras duas variáveis. Essencialmente, quanto maior o teor em betume, maior a resistência à fadiga das misturas betuminosas.

A realização de ensaios com períodos de repouso é representativa das solicitações que ocorrem *in situ*, e aumenta a resistência à fadiga e às deformações permanentes das misturas betuminosas

Relativamente à resistência às deformações permanentes, o principal factor que afecta o comportamento das misturas betuminosas é a temperatura. Quanto mais elevada é a temperatura do pavimento, menor é a resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes. Por esse motivo, a resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes deve ser avaliada para a máxima temperatura prevista para o pavimento.

No Quadro 2.7, indicam-se os principais factores que influenciam a resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes, referindo-se a consequência da sua variação na resistência às deformações permanentes.

Quadro 2.7 – Efeito da variação de alguns factores no comportamento às deformações permanentes (Tayebali et al., 1993)

Factor		Variação	Efeito
Agregados	Textura superficial	Lisa a rugosa	Melhora
	Granulometria	Descontínua a contínua	Melhora
	Forma	Esférica a cúbica	Melhora
	Dimensão máxima	Aumento	Melhora
Betume	Rigidez	Aumento	Melhora
Mistura Betuminosa	Teor em betume	Aumento	Prejudica
	Porosidade	Aumento	Prejudica
	VMA	Aumento	Prejudica
Condições de serviço	Processos de compactação	Aumento	Diverso
	Temperatura	Aumento	Prejudica
	Estado de tensão/deformação	Aumento	Prejudica
	Repetição de carga	Aumento	Prejudica
	Teor em água	Aumento	Prejudica

Relativamente à composição da mistura betuminosa, os principais factores que afectam a resistência às deformações permanentes são o teor em betume e a forma dos agregados. No entanto, a porosidade não deve ser muito baixa (inferior a 4%), nem muito elevada, para se evitar a ocorrência de deformações permanentes. Essencialmente, quanto maior o teor em betume, menor a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas.

Finalmente, deve referir-se que a forma como os diversos factores apresentados nos Quadros 2.6 e 2.7 influenciam o comportamento das misturas betuminosas apenas é válido para as condições de serviço habitualmente observadas nos pavimentos, que correspondem às condições em que Tayebali et al. (1993) efectuaram os estudos que conduziram a esses quadros resumo.

2.9. Conclusões

Os pavimentos rodoviários flexíveis são constituídos por materiais granulares e por misturas betuminosas, dependendo o seu desempenho das solicitações aplicadas (factores activos), da estrutura do pavimento e das propriedades dos materiais granulares e das misturas betuminosas que o compõem (factores passivos).

Como factor passivo que influencia o desempenho do pavimento, é fundamental que se garanta um bom comportamento das misturas betuminosas. A comprovar a importância que o comportamento das misturas betuminosas tem no desempenho do pavimento, observou-se que, em geral, a degradação dos pavimentos pode ser originada por uma má qualidade das misturas betuminosas.

Para melhorar o desempenho do pavimento, devem seleccionar-se misturas betuminosas cujo comportamento se adeque ao tipo de estrutura pretendida para o pavimento (mais ou menos rígida, mais ou menos flexível) e às funções que a mistura vai desempenhar no pavimento (por exemplo, não é necessário garantir uma boa resistência ao desgaste numa mistura a aplicar em camada de base).

O comportamento das misturas betuminosas é bastante influenciado pela sua composição, tendo-se observado que os principais parâmetros de composição que afectam as propriedades das misturas betuminosas são a granulometria dos agregados e o teor em betume.

A caracterização dos agregados e do betume é fundamental para se garantir um comportamento adequado das misturas betuminosas. Os agregados são caracterizados, essencialmente, pela sua curva granulométrica e pela sua resistência ao desgaste. O betume pode ser caracterizado através da penetração e temperatura de amolecimento. Com base nestas duas características pode avaliar-se a variação da viscosidade do betume em função da temperatura e, desse modo, pode determinar-se a susceptibilidade térmica do betume. Além disso, consegue definir-se as temperaturas ideais de produção e de compactação das misturas betuminosas.

Para determinação da composição que garante um comportamento adequado das misturas betuminosas *in situ*, recorre-se aos métodos de formulação de misturas betuminosas. A existência de diversas categorias de métodos de formulação, cada uma com as suas vantagens e desvantagens, obriga a uma escolha criteriosa do método de formulação a utilizar em cada situação concreta.

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), sem estar comprometido o desempenho da mistura betuminosa no pavimento.

Para pavimentos submetidos a um tráfego intenso, os métodos de formulação mais recentes, relacionados com e baseados no comportamento das misturas betuminosas, são os únicos que garantem um comportamento adequado das misturas betuminosas no pavimento, sendo por isso utilizados pelos principais organismos a nível mundial. Estes métodos de formulação avaliam o desempenho duma mistura betuminosa através de ensaios que simulam determinado comportamento da mistura betuminosa *in situ*.

Em investigação, quando se pretende estudar o comportamento das misturas betuminosas, os métodos de formulação relacionados com e baseados no comportamento das misturas betuminosas apresentam claras vantagens sobre os restantes métodos, dado que:

- permitem comparar as misturas betuminosas explicitamente, no que respeita a determinados comportamentos exigidos;
- os ensaios fundamentais e de simulação utilizados, permitem simular o estado de tensão e deformação existente no pavimento;

- existe uma boa correlação entre os resultados medidos nos ensaios de laboratório e o comportamento das misturas betuminosas observado, posteriormente, *in situ*;
- é possível estudar a utilização de novos materiais.

As propriedades mecânicas das misturas betuminosas, normalmente avaliadas nos métodos de formulação relacionados com o comportamento das misturas betuminosas, são a rigidez, a resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência às deformações permanentes.

Entre os diversos ensaios disponíveis para caracterização das misturas betuminosas, observou-se que um dos ensaios mais utilizados para avaliação da resistência ao fendilhamento por fadiga é o ensaio de flexão simples repetida em quatro pontos. Para avaliação da resistência às deformações permanentes, o ensaio de corte simples repetido com altura constante é um dos mais representativos do fenómeno que se pretende estudar. Com estes dois ensaios também é possível determinar o módulo de rigidez da mistura betuminosa.

Os principais factores que influenciam o módulo de rigidez das misturas betuminosas são a frequência de aplicação de cargas e a temperatura. O módulo de rigidez aumenta quando a frequência aumenta e quando a temperatura diminui. Em relação à composição das misturas betuminosas, o tipo de betume e o volume de vazios são os factores mais influentes, com o aumento do módulo de rigidez para betumes mais duros e menores volumes de vazios.

A resistência à fadiga das misturas betuminosas, avaliada em ensaios laboratoriais, depende principalmente do modo de carregamento (tensão ou extensão controlada) e da temperatura. Relativamente à composição da mistura betuminosa, os principais factores que afectam a resistência à fadiga são o teor em betume e a porosidade. Essencialmente, quanto maior o teor em betume, maior a resistência à fadiga das misturas betuminosas.

O principal factor que afecta a resistência às deformações permanentes é a temperatura do pavimento, cujo aumento faz diminuir a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas. Os principais parâmetros de composição que afectam a resistência às deformações permanentes são o teor em betume e a forma dos agregados. Essencialmente, quanto maior o teor em betume, menor a resistência às deformações permanentes.

CAPÍTULO 3

MASTIQUE BETUMINOSO E LIGAÇÃO AGREGADO-MASTIQUE

3.1. Introdução

O comportamento das misturas betuminosas tem uma grande influência no desempenho dos pavimentos durante o seu período de vida. Para se garantir um adequado comportamento das misturas betuminosas em serviço, em relação às funções que estas desempenham no pavimento, é necessário avaliar as suas propriedades em ensaios fundamentais e de simulação.

Embora as propriedades das misturas betuminosas avaliadas nesses ensaios sejam, normalmente, a resistência à fadiga e às deformações permanentes, a ligação agregado-mastique também influencia o comportamento das misturas betuminosas em serviço. Uma fraca ligação agregado-mastique pode originar a desagregação das misturas betuminosas e, conseqüentemente, pode causar uma diminuição da resistência à fadiga e às deformações permanentes (Scholz, 1995).

Neste capítulo analisam-se os conhecimentos existentes sobre a ligação agregado-mastique das misturas betuminosas, especialmente os principais mecanismos de ligação entre o mastique e os agregados, assim como os principais mecanismos de perda de ligação durante o período de vida da mistura betuminosa no pavimento.

No entanto, para se avaliar adequadamente a ligação agregado-mastique, é necessário compreender a diferenciação entre estes dois componentes numa mistura betuminosa. Assim, este capítulo começa por apresentar uma revisão dos estudos efectuados sobre o mastique betuminoso, nomeadamente sobre a sua composição, comportamento e influência no desempenho das misturas betuminosas.

Na Secção 3.2., apresenta-se a definição de mastique betuminoso utilizada neste trabalho, assim como a definição utilizada por outros investigadores.

Os conhecimentos actuais sobre os factores determinadores do comportamento dos mastiques betuminosos e sobre a influência do mastique no desempenho das misturas betuminosas em serviço são apresentados, respectivamente, nas Secções 3.3 e 3.4.

Na Secção 3.5, descrevem-se os diversos mecanismos que promovem a ligação agregado-mastique ou que originam a perda desta ligação nas misturas betuminosas.

Na Secção 3.6, analisam-se os dois principais factores que influenciam a ligação agregado-mastique das misturas betuminosas em serviço: i) o envelhecimento do betume; ii) a presença de água nas misturas betuminosas. Para cada um destes factores são indicadas as consequências do seu aparecimento numa mistura betuminosa e os mecanismos de degradação que estes promovem.

Em seguida, na Secção 3.7, são apresentados os ensaios que permitem avaliar os principais factores que afectam a ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas em serviço, nomeadamente, os ensaios de envelhecimento e os ensaios de sensibilidade à água.

Finalmente, na Secção 3.8, indicam-se os diferentes tipos de aditivos e tratamentos “anti-descolagem” a utilizar nas misturas betuminosas para melhorar a ligação agregado-mastique e para reduzir a os efeitos da presença de água nas misturas betuminosas.

O objectivo deste capítulo é sintetizar e analisar os conhecimentos existentes sobre o comportamento dos componentes numa mistura betuminosa, nomeadamente, o mastique e a ligação agregado-mastique, e a importância que estes têm na melhoria do desempenho dos pavimentos. Desta forma, pretende-se definir e justificar a investigação realizada na fase experimental deste trabalho, apresentada nos próximos capítulos.

3.2. Definição de Mastique Betuminoso

O mastique betuminoso sempre foi considerado como uma mistura de filer e de betume que envolve e aglutina os agregados grossos das misturas betuminosas, além de preencher os vazios existentes no esqueleto mineral de modo a garantir compacidade, impermeabilidade e trabalhabilidade às misturas betuminosas.

Habitualmente, nos estudos do mastique caracteriza-se o filer, a relação filer/betume e o tipo de ligação entre o filer e o betume, para avaliar a sua influência no comportamento do

mastique e das misturas betuminosas. As conclusões desses estudos indicam que o mastique, assim como os seus componentes (especialmente o filer), têm uma influência significativa no comportamento das misturas betuminosas, o que justificou, em grande parte, a importância que se deu ao estudo do mastique no presente trabalho.

Ao analisar os vários trabalhos sobre o mastique betuminoso foi possível observar que as propriedades do filer, do mastique e das misturas betuminosas são avaliadas através de ensaios muito diferentes. Embora a comparação entre as propriedades avaliadas nesses ensaios seja possível, qualquer semelhança pode ser apenas casual.

Idealmente devia comparar-se o filer, o mastique e a mistura betuminosa recorrendo ao mesmo tipo de ensaios, que devem relacionar-se com o desempenho do mastique e das misturas betuminosas no pavimento. Isso seria possível se o mastique tivesse suficiente consistência para ser ensaiado mecanicamente, caso o mastique fosse constituído por uma determinada quantidade de agregados finos, além do filer e do betume.

Nesse contexto, analisou-se a definição de mastique apresentada nos trabalhos de Harm and Hughes (1989), Mohamed and Nofal (1998), Sadd and Dai (2001), Buttlar and You (2001), Sadd et al. (2002) e You and Buttlar (2005). Estes autores consideram a heterogeneidade das misturas betuminosas, que são constituídas por dois materiais distintos, nomeadamente, o mastique e os agregados mais grossos. O mastique, constituído pelos elementos mais finos da mistura betuminosa (betume, filer e agregados finos), forma uma matriz com um comportamento visco-plástico que envolve e mantém ligados os agregados mais grossos, considerados elementos elásticos embebidos no mastique.

Nos trabalhos destes autores indica-se que a dimensão dos agregados grossos é sempre superior a 2 mm, o que significa que os agregados finos, de dimensão inferior a esta, fazem parte do mastique betuminoso que mantém ligados os agregados grossos.

Os manuais de procedimento de ensaio para misturas betuminosas do *Texas Department of Transportation* (2004) também define que os “agregados grossos” numa mistura betuminosa correspondem aos agregados de dimensões superiores a 2 mm (peneiro #10), enquanto a definição de “agregados finos” numa mistura betuminosa corresponde a todos os agregados com dimensões inferiores a 2 mm (peneiro #10), incluindo o filer.

Independentemente das definições de mastique já apresentadas, neste trabalho considera-se que o mastique betuminoso é o material que envolve e se liga aos agregados grossos numa mistura betuminosa. Assim, foi possível analisar e definir a composição do mastique existente nas misturas betuminosas produzidas neste trabalho, que será apresentada no Capítulo 4.

Esta definição de mastique permitiu produzir mastiques betuminosos em laboratório com coesão suficiente para serem submetidos a ensaios mecânicos, conseguindo assim atingir-se outro objectivo deste trabalho: comparar o comportamento do mastique e das misturas betuminosas recorrendo ao mesmo tipo de ensaios mecânicos, relacionados com o desempenho destes materiais no pavimento.

Em seguida, analisam-se os principais trabalhos realizados sobre a composição e o comportamento dos mastiques betuminosos e sobre a influência que o mastique (ou os seus componentes) tem no comportamento das misturas betuminosas.

3.3. Composição e Comportamento do Mastique Betuminoso

De acordo com Dukatz and Anderson (1980), as misturas betuminosas são compostas por agregados ligados por um aglutinante betuminoso, o mastique. Os agregados que compõem a mistura betuminosa têm tamanhos que variam desde grossos até finos, incluindo o filer. No entanto, os agregados finos e o filer fazem parte do mastique betuminoso.

Gastmans (1990) também se refere ao mastique como sendo um sub-sistema do sistema global que é a mistura betuminosa. A qualidade e a quantidade de material utilizado em cada sub-sistema, assim como a interacção entre os diferentes sub-sistemas determinam a qualidade final do sistema global. Assim, uma melhoria na qualidade do mastique representa um ganho (em maior ou menor escala) nas propriedades mecânicas da mistura betuminosa.

De Palma et al. (2000), ao descreverem o método racional que desenvolveram para formulação de misturas betuminosas (denominado de “Método dos Vazios”), apresentam algumas indicações relativamente à composição e às funções do mastique na estrutura duma mistura betuminosa.

De acordo com este método, a mistura betuminosa, composta por betume, agregados de três “classes” (grossos, finos e filer), e por um determinado volume de vazios, é modelada volumetricamente. O método assume que os vazios existentes nos agregados grossos (envolvidos por betume) vão ser preenchidos pelos agregados finos (envolvidos por betume). Esta estrutura vai ser preenchida pelo filer e pelo betume, que vão actuar como aglutinante, também denominado de mastique betuminoso. A proporção entre o filer e o betume é calculada com base na porosidade pretendida para a mistura betuminosa.

Smith and Hesp (2000) estudaram os efeitos das dimensões das partículas de filer na recuperação mecânica (*Healing*) do mastique e da mistura betuminosa a baixas temperaturas. A recuperação mecânica foi avaliada pela medição da recuperação da rigidez em cada provete após um período de 2 horas de repouso a seguir a um ensaio de fadiga num reómetro dinâmico. Os autores concluíram que os mastiques com filer mais grosso têm uma recuperação mecânica maior do que os mastiques com um filer mais fino.

Pilat et al. (2000), ao investigarem a possibilidade de melhorar a resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas, apresentaram vários resultados de ensaios com os quais procuraram conhecer e melhorar as propriedades viscoelásticas do mastique, e o seu efeito nas propriedades reológicas das misturas betuminosas.

Este estudo permitiu obter especificações relativas ao mastique a utilizar em misturas betuminosas com uma resistência às deformações permanentes melhorada. A adição de cal hidráulica, a substituir parte do filer mineral, melhora a resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes. A composição óptima dos mastiques com cal hidráulica obtida foi a seguinte: filer mineral : cal hidráulica : betume = 1,2 : 0,3 : 1. Os mastiques produzidos com esta composição e com um betume 50/70 apresentavam as seguintes propriedades:

- a diferença entre a temperatura de amolecimento do mastique e do betume situava-se, aproximadamente, entre 9 e 14 °C;
- a adesividade do mastique ao basalto foi superior a 70%;
- a viscosidade dinâmica do mastique a 90 °C variava de 110 a 200 Pa.s;
- o módulo complexo do mastique, a uma temperatura de 40 °C, para uma velocidade angular de 10² rad/s, situava-se entre 1×10⁵ e 2×10⁵ Pa;
- a resistência à tracção do mastique superior a 30 N.

De acordo com os mesmos autores, o aglutinante das misturas betuminosas é constituído por betume e filer, ou seja, o mastique. As propriedades do mastique são determinadas pelo tipo e pela quantidade dos seus componentes, pelas propriedades reológicas do betume e pela forma e estrutura dos grãos de filer. O mastique tem uma grande influência na estrutura da mistura betuminosa a um nível micro-estrutural. Assim, os ensaios sobre o mastique permitem a previsão das propriedades das misturas betuminosas a um nível micro-estrutural.

O filer, como componente duma mistura betuminosa, desempenha uma função importante nas propriedades e no comportamento das misturas betuminosas. Geralmente, refere-se que o papel do filer numa mistura betuminosa é muito complexo. Por um lado, o filer serve de material inerte para preenchimento dos vazios entre os agregados mais grossos da mistura betuminosa. Por outro lado, devido às suas características superficiais de material muito fino, o filer é um material activo, cuja actividade é manifestada nas propriedades da ligação entre o filer e o betume. Estas propriedades têm uma influência significativa na melhoria do comportamento do mastique, e nas seguintes propriedades das misturas betuminosas:

- o comportamento mecânico;
- o teor óptimo em betume;
- a durabilidade;
- a trabalhabilidade.

Devido à importância do filer nas misturas betuminosas, Craus et al. (1978) estudaram as características físico-químicas de diferentes tipos de filer e avaliaram a sua influência no comportamento do mastique e das misturas betuminosas. Neste estudo foram avaliadas as seguintes características de seis tipos de filer: i) características geométricas; ii) intensidade de adsorção⁹; iii) adsorção e absorção selectiva¹⁰. Para a obtenção de correlações práticas entre o comportamento do mastique e das misturas betuminosas, Craus et al. (1978) efectuaram ensaios reológicos sobre mastiques produzidos com filer e betume, e ensaios de resistência mecânica sobre misturas betuminosas.

Craus et al. (1978) referem que a irregularidade geométrica do filer (forma e textura superficial) desempenha uma função importante nas misturas betuminosas. Especificamente, a

⁹ A adsorção é a acumulação de uma camada muito fina de moléculas dum gás, soluto ou líquido (betume) na superfície de um sólido (filer), com o qual estão em contacto.

¹⁰ A absorção é a incorporação, através de poros ou interstícios (do filer), de moléculas dum gás, soluto ou líquido (betume). O termo “selectiva” refere-se ao facto de apenas parte das moléculas do betume serem adsorvidas ou absorvidas pelo filer.

irregularidade geométrica afecta o teor óptimo em betume da mistura betuminosa, as propriedades interfaciais dos sistemas filer-betume (mastiques), e o comportamento reológico dos mastiques, o que tem uma consequência directa no desempenho mecânico e estrutural das misturas betuminosas e dos pavimentos rodoviários.

Os mesmos autores referem que o efeito da irregularidade geométrica do filer no comportamento da mistura betuminosa se faz sentir através das propriedades do mastique, que podem ser analisadas através das seguintes características: i) absorção; ii) actividade superficial; iii) superfície específica¹¹.

Quanto maior a irregularidade geométrica do filer maior a sua superfície específica, originando o aumento da viscosidade e da temperatura de amolecimento do mastique onde é utilizado, e a diminuição da penetração e da ductilidade desse mastique. O mesmo acontece quando se aumenta a proporção filer/betume em determinado mastique. Assim, é fundamental que se tenha em consideração a superfície específica do filer ao escolher a proporção filer/betume de determinada mistura betuminosa.

A irregularidade geométrica do filer também aumenta a sua actividade superficial¹² em contacto com o betume, embora esta actividade dependa principalmente da composição mineralógica e química do filer. O aumento da actividade superficial do filer origina um aumento da consistência do mastique, devido ao aumento da adsorção de betume pelo filer.

A irregularidade geométrica do filer, e especialmente a sua textura superficial e porosidade, têm uma consequência directa na quantidade de betume adsorvido pelo mastique existente na mistura betuminosa. Craus et al. (1978) referem que a existência de betume adsorvido obriga a um aumento do teor em betume da mistura betuminosa sem ganho significativo ao nível do comportamento mecânico, sendo técnica e economicamente injustificado. Assim, nestes casos deve rejeitar-se a utilização destes tipos de filer.

A intensidade de adsorção entre o filer e o betume pode ser definida como a variação na concentração dos componentes do filer e do betume na interface entre o filer e o betume e em regiões próximas. Esta variação na concentração é causada por vários tipos de forças de atracção mútua que podem ser de natureza mecânica, cinética, electrostática, térmica ou

¹¹ A superfície específica é igual à área superficial dos agregados a dividir pelo seu volume.

¹² A actividade superficial do filer representa a capacidade das partículas de filer em adsorver o betume.

química. O tipo de força de atracção determina o tipo específico de adsorção: i) adsorção mecânica; ii) adsorção cinética; iii) adsorção electrostática; iv) adsorção térmica; v) adsorção química. O mecanismo de adsorção é normalmente acompanhado por uma redução na energia interfacial, com uma libertação de energia calorífica, que pode ser utilizada como critério para avaliar a intensidade de adsorção (Craus et al., 1978).

No mastique, os principais factores que afectam o mecanismo de adsorção são a composição do betume e as propriedades do filer, nomeadamente, a composição mineralógica, a textura superficial e a superfície específica, o que demonstra que a adsorção depende principalmente do tipo de filer (Craus et al., 1978). Por exemplo, a adsorção entre o betume e a cal hidráulica é muito intensa, correspondendo a uma adsorção química. Por outro lado, a adsorção do betume com um filer silicioso é essencialmente uma adsorção mecânica de moléculas não polares através de forças Van der Waals, com uma fraca intensidade.

No estudo de Craus et al. (1978), a avaliação do filer através da energia interfacial libertada devido ao mecanismo de adsorção originou resultados idênticos aos obtidos para a irregularidade geométrica do filer e para o comportamento reológico dos mastiques, o que demonstra a influência destes factores no desempenho do mastique.

Uma das mais importantes propriedades na interface filer-betume é a adsorção e a absorção selectiva de grupos químicos do betume. A absorção e a adsorção selectiva são avaliadas em conjunto, por ser difícil a separação destes dois processos, que são influenciados por factores combinados, como: i) a composição do betume; ii) as propriedades físico-químicas da superfície do filer; iii) a estrutura interna das partículas de filer.

A contribuição do filer para a adsorção e absorção selectiva do betume na interface filer-betume é de natureza física e química. As propriedades químicas da superfície do filer são responsáveis pela intensidade específica da adsorção, enquanto as propriedades físicas da superfície do filer determinam a magnitude dessa adsorção. Dependendo essencialmente das propriedades químicas da superfície do filer, vários tipos de adsorção, com diferentes intensidades, podem ser observados, desde uma adsorção “móvel” criada por forças Van der Waals até uma adsorção muito mais intensa devido a reacções químicas.

Embora a adsorção e a absorção selectiva ocorra a uma micro escala, Craus et al. (1978) desenvolveram um ensaio de percolação do betume diluído através de diferentes tipos de filer,

para simular a absorção e adsorção selectiva a uma macro escala. As principais conclusões desse estudo são apresentadas em seguida.

- O comportamento do mastique e das misturas betuminosas depende significativamente das propriedades físico-químicas do filer na interface filer-betume.
- O filer com maior irregularidade geométrica também apresenta uma maior intensidade de adsorção e um maior potencial de absorção e adsorção selectiva, aumentando a resistência das ligações filer-betume e a quantidade de betume fixado pelo filer, o que origina um mastique com uma maior consistência e misturas betuminosas mais resistentes.
- Entre os diversos tipos de filer estudados, a cal hidráulica foi a que demonstrou ter melhores características físico-químicas, originando por isso mastiques com uma maior consistência, acontecendo o contrário para o filer silicioso.
- A intensidade de adsorção entre o betume e o filer, determinada pela quantidade de calor libertada, é a propriedade que melhor consegue avaliar as características físico-químicas do filer e a sua influência no comportamento do mastique e das misturas betuminosas.

Num estudo de Kavussi and Hicks (1997), sobre a influência do filer no comportamento do mastique e das misturas betuminosas, foi possível observar que as propriedades físicas de diferentes filers têm um efeito directo nas propriedades mecânicas do mastique que vão originar. Estes autores concluíram que as propriedades do mastique se relacionam directamente com as dimensões das partículas de filer, embora o aumento da concentração em filer seja o factor mais influente no aumento da consistência do mastique. No entanto, o aumento do teor em filer origina um mastique mais frágil a baixas temperaturas, principalmente quando o filer é poroso.

Cooley Jr. et al. (1998) realizaram uma revisão dos ensaios de caracterização do filer e dos mastiques. Nessa revisão, concluíram que o ensaio mais utilizado para caracterizar o filer, e que melhor se correlaciona com o comportamento dos mastiques e das misturas betuminosas, é o ensaio para determinação do volume de vazios de Ridgen¹³.

Em relação ao mastique, observaram que os ensaios mais utilizados para a sua caracterização eram o ensaio de viscosidade cinemática e o ensaio de amolecimento pelo método do “anel e bola”, medindo-se a variação da viscosidade ou da temperatura de amolecimento, em relação

¹³ O volume de vazios de Ridgen é volume de vazios, em percentagem, numa amostra de filer mineral seco e compactado.

ao betume original, quando se adicionava determinada quantidade de filer para formar o mastique.

A existência de novos ensaios desenvolvidos durante o programa SHRP, para caracterização de betumes, levou ao desenvolvimento do restante trabalho de Cooley Jr. et al. (1998), no qual caracterizaram diferentes mastiques (misturas de filer e betume) recorrendo aos ensaios Superpave para caracterização de betumes.

Com base nessa investigação, os autores concluíram que o volume de vazios de Ridgen modificado pode ser utilizado para caracterizar o potencial de endurecimento do filer no mastique, quando este é medido através da temperatura de amolecimento, da viscosidade a 135 °C ou do módulo de corte. Além disso, decidiram limitar a percentagem de filer a utilizar no mastique a 55 % do volume total. Para esta proporção filer/betume o desempenho do mastique medido nos ensaios Superpave a temperaturas altas e intermédias aumentou 3 vezes em relação ao betume que lhe deu origem, tendo aumentado 3,7 vezes a baixas temperaturas.

Huschek and Angst (1980) avaliaram o comportamento de mastiques (misturas de filer e betume) a baixas e a altas temperaturas, indicando que o objectivo fundamental para melhorar o comportamento do mastique a altas temperaturas é obter a máxima viscosidade possível, sem comprometer a trabalhabilidade da mistura betuminosa (o comportamento foi avaliado através da viscosidade cinemática a 40 °C). O objectivo a baixas temperaturas é obter mastiques com a máxima extensão na rotura (o comportamento foi avaliado através de ensaios de tracção indirecta a -15 °C e uma velocidade de 52 mm/min). Para atingir estes dois objectivos foi necessário seleccionar tipos de betume e de filer adequados, sem problemas de ligação, e conseguir determinar a relação óptima entre os dois componentes do mastique.

Para melhorar o comportamento do mastique a temperaturas elevadas é necessário aumentar a sua viscosidade, o que pode ser conseguido através dos seguintes métodos:

- utilização de um betume mais duro;
- utilização duma maior quantidade de filer;
- utilização de um filer mais “forte”¹⁴.

¹⁴ A classificação de filer “médio” ou “forte” é utilizada na Holanda para caracterizar a menor ou maior capacidade do filer para aumentar a consistência do betume quando adicionado a este para formar um mastique. A avaliação desta característica é realizada através do aumento da temperatura de amolecimento do betume. Um filer “forte” garante um maior aumento da consistência do betume quando se junta a este para formar um mastique.

A utilização dum betume mais duro não é muito favorável, dado que este tipo de betumes tem, normalmente, um mau comportamento a baixas temperaturas. A utilização de teores em filer mais elevados é uma solução adequada até determinado limite, a partir do qual começa a tornar o mastique mais frágil a temperaturas reduzidas. Assim, a solução ideal é a utilização de um filer mais “forte”.

Conforme se pôde observar, a avaliação experimental do comportamento do mastique através de ensaios mecânicos que podem ser relacionados directamente com determinado modo de degradação do pavimento, é praticamente inexistente. Assim, salienta-se a inovação do presente trabalho, na sua parte experimental, pela avaliação de diversas propriedades mecânicas do mastique, que posteriormente são relacionadas com o comportamento de misturas betuminosas.

3.4. Influência do Mastique no Comportamento das Misturas Betuminosas

Pilat et al. (2000) realizaram diversos estudos sobre a influência dos mastiques nas propriedades das misturas betuminosas, especialmente no seu comportamento em relação às deformações permanentes, a partir dos quais resumiram as seguintes indicações:

- a definição da composição óptima dos mastiques com base na determinação da proporção filer/betume e na análise das propriedades do filer (propriedades reológicas e de endurecimento do betume) é adequada;
- a adição de cal hidráulica a substituir parte do filer melhora a adesividade do mastique aos agregados, aumenta a coesão interna do mastique e garante uma melhor resistência das misturas betuminosas às deformações permanentes a altas temperaturas.

Relativamente à influência da granulometria do filer no comportamento das misturas betuminosas, Anderson et al. (1994) salientam que os finos que formam o mastique podem conter uma fracção considerável de partículas maiores que 76 micron (peneiro #200). Os mesmos autores também sublinharam que a interacção entre o betume e os agregados finos tem uma grande influência no comportamento das misturas betuminosas.

Ishai et al. (1980) efectuaram um estudo para relacionar as propriedades do filer com o desempenho das misturas betuminosas. Nesse estudo desenvolveram um modelo básico que

considerava que a mistura betuminosa era composta por dois componentes: i) agregados envolvidos por betume; ii) um aglomerante composto por betume e filer, ou seja, o mástico. O modelo foi analisado através de relações de peso e volume até se obter um valor α que corresponde ao teor óptimo em betume do mástico, em termos volumétricos.

O valor α foi comparado com o mástico óptimo necessário para obter o máximo desempenho mecânico das misturas betuminosas, usando critérios de rotura e deformabilidade. O valor α demonstrou ser sensível à utilização de diferentes tipos de filer. Em comparação com o módulo resiliente, a estabilidade obtida no ensaio de Marshall distinguiu melhor as misturas betuminosas que utilizaram diferentes tipos de filer. O valor α também se correlacionou bem com as propriedades físico-químicas do filer.

No estudo de Ishai et al. (1980) tornou-se evidente que as propriedades e as proporções do mástico, assim como as propriedades do filer, são os principais factores que governam o comportamento mecânico das misturas betuminosas.

Harris and Stuart (1995) efectuaram um estudo no qual analisaram as propriedades de diferentes tipos de filer e de mastiques produzidos com esses filers. Essas propriedades foram correlacionadas com o desempenho observado em pavimentos realizados com esses tipos de filer e mastiques. Depois de terem definido que a máxima dimensão do filer era de 150 micron, foram determinadas as suas diversas propriedades para o caracterizar adequadamente.

Inicialmente, esses autores fizeram uma análise granulométrica do filer através do ensaio de difracção por laser, o que permitiu obter diversos parâmetros de distribuição do filer pelas suas diferentes dimensões, que são indicados em seguida.

- O módulo de finura, que representa a finura do filer. Quanto menor for este valor mais fino é o filer.
- A superfície específica. Quanto maior for este valor mais fino é o filer.
- O coeficiente de uniformidade, que representa o intervalo de dimensões de partículas existentes no filer. Quanto maior o valor deste coeficiente maior o intervalo de dimensões de partículas existente no filer.
- O coeficiente de curvatura, que indica a forma da curva granulométrica do filer.
- Os coeficientes de distorção na distribuição das diferentes dimensões no filer. No caso duma distribuição normal, os valores dos coeficientes são iguais.

- A mediana das partículas do filer, que corresponde à dimensão para a qual a percentagem de passados é igual a 50%.
- A percentagem de material mais fino que 30 micron e que 10 micron. Estes valores permitem avaliar a variabilidade dos resultados obtidos no ensaio de difracção por laser.

Em seguida, Harris and Stuart (1995) determinaram a massa volúmica e o volume de vazios de Ridgen modificado do filer. O volume de vazios de Ridgen é visto como sendo o volume de betume no mastique que está fixado e não está disponível para participar na mistura betuminosa como um todo. Quando este valor é muito alto, não existe suficiente betume livre para a mistura, o que pode originar um excesso de rigidez das misturas betuminosas ou uma maior susceptibilidade à rotura por fendilhamento. Por outro lado, quando este valor é muito baixo, as misturas betuminosas são susceptíveis ao aparecimento de exsudação ou deformações permanentes. Harris and Stuart (1995) concluíram que o volume de vazios de Ridgen deve situar-se entre 34 e 39 %.

A influência do filer no mastique foi avaliada através do seu poder de endurecimento (*Stiffening Power*), que é calculado como a diferença entre a temperatura de amolecimento do mastique produzido com esse filer e do betume utilizado no mastique. No trabalho de Harris and Stuart (1995) os mastiques foram preparados numa proporção constante de filer : betume igual a 35 : 65 em percentagem de volume. O poder de endurecimento do filer situou-se entre 10 e 20 °C. Também foi utilizado o reómetro dinâmico de corte para determinar o poder de endurecimento do filer, que foi calculado como o aumento de temperatura necessário para obter um módulo de corte do mastique igual ao determinado para o betume a 50 °C.

Depois de avaliados os filers e os mastiques, estes foram utilizados em diversas misturas betuminosas aplicadas em pavimentos. O desempenho dessas misturas foi observado e classificado como “bom” ou “mau”.

Finalmente, os diversos parâmetros de caracterização do filer e dos mastiques foram relacionados com o desempenho das misturas observado no pavimento. Os autores não encontraram nenhuma correlação entre o poder de endurecimento do filer nos mastiques e o desempenho das misturas observado no pavimento. A única variável independente capaz de distinguir as misturas betuminosas com um bom ou mau desempenho no pavimento foi o volume de vazios de Ridgen, utilizado para caracterizar o filer. No entanto, estes autores

desenvolveram um modelo matemático baseado no volume de vazios de Ridgen, nos coeficientes de distorção e de uniformidade, no módulo de finura e na superfície específica do filer, que conseguiu prever o desempenho das misturas betuminosas no pavimento.

Kavussi and Hicks (1997) também avaliaram a função do filer no comportamento das misturas betuminosas. Dos diversos ensaios utilizados para caracterização do filer, concluiu-se que o volume de vazios de Ridgen modificado era o melhor indicador do comportamento do filer na mistura betuminosa. Diferentes mastiques produzidos com vários tipos de filer foram ensaiados de modo a determinar a penetração e a viscosidade, o que permitiu avaliar o modo como o filer endurece o mástico e a sua susceptibilidade térmica.

Finalmente, foram produzidas misturas betuminosas com os diferentes tipos de filer e mastiques, e ensaiadas à flexão a baixas temperaturas e no ensaio de Marshall. Os resultados obtidos no ensaio de flexão a baixas temperaturas permitiram determinar aumento de resistência a baixas temperaturas e, conseqüentemente, o teor óptimo em filer das misturas betuminosas. Assim, os autores concluíram que cada mistura tem um teor óptimo em filer que maximiza a sua resistência a baixas temperaturas. No estudo de Kavussi and Hicks (1997) o teor óptimo em filer correspondeu a uma relação filer/betume entre 0,25 e 0,75.

Além disso, observaram que o ensaio de Marshall não é adequado para caracterizar as diferenças de comportamento entre misturas betuminosas que utilizaram diferentes tipos de filer. Por outro lado, o tipo e o teor em filer influenciam significativamente as propriedades das misturas betuminosas à flexão: o aumento do teor em filer aumenta a resistência à flexão e o módulo de rigidez.

Num trabalho realizado por Hesp et al. (2001), sobre o efeito do filer no desempenho dos mastiques e das misturas betuminosas a baixas e a altas temperaturas, os resultados mostraram que o desempenho é significativamente diferente entre misturas betuminosas com granulometrias iguais acima do peneiro #200. Estas observações permitiram explicar algumas variações, por vezes obtidas no comportamento das misturas betuminosas no pavimento, e que não eram compreendidas até esse momento. De facto, não se considerava que pequenas alterações na granulometria dos agregados finos e do filer podiam ter um impacto considerável nos principais tipos de degradação dos pavimentos.

O mecanismo de fixação de fendas¹⁵ (*crack pinning*), utilizado por Hesp et al. (2001) para estudar o comportamento do mastique a baixas temperaturas, foi proposto pela primeira vez por Lange (1970), de modo a explicar o aumento de resistência à fractura observado no mastique, no momento em que o filer é adicionado a um material frágil (neste caso, o betume a temperaturas reduzidas). Posteriormente, Evans (1972) desenvolveu uma teoria complexa mais coerente para explicar o modo como a resistência à fractura e a energia de fractura dependem das condições experimentais, nomeadamente a distância entre as partículas de filer, o tamanho destas e a fracção volumétrica de filer existente no mastique.

Rodríguez et al. (1996) mostraram que esta teoria é aplicável ao mastique betuminoso para previsão do comportamento na rotura a baixas temperaturas. As principais conclusões desse trabalho foram as seguintes:

- as previsões baseadas nesta teoria (*crack pinning*) estão em concordância com os resultados obtidos em ensaios experimentais, o que comprova a ocorrência do mecanismo de fixação de fendas no mastique betuminoso a baixas temperaturas;
- esta teoria permite avaliar o volume óptimo de filer a utilizar no mastique betuminoso para aumentar a sua resistência à fractura a baixas temperaturas.

De acordo com Hesp et al. (2001), a previsão da resistência à fractura dos mastiques betuminosos com base no mecanismo de fixação de fendas permitiu concluir que essa resistência é mais elevada dentro dos limites indicados, por Harris and Stuart (1995) e Kavussi and Hicks (1997), para a relação filer/betume e para o volume de vazios de Ridgen modificado.

Hesp et al. (2001), nas conclusões do seu trabalho, referem que a semelhança de todos os resultados obtidos nos ensaios de fractura por flexão em três pontos a baixas temperaturas, em misturas betuminosas com diferentes granulometrias dos agregados e do filer, sugerem que o mecanismo de fixação de fendas é, pelo menos, parcialmente responsável pelo desempenho obtido. As dimensões das partículas de filer (granulometria) e a forma dos agregados finos têm um efeito significativo na resistência às deformações permanentes das misturas betuminosas a temperaturas elevadas.

¹⁵ A fixação de fendas ocorre no mastique quando a frente duma fenda que se propaga em determinado material (betume) se aproxima duma série de inclusões ou partículas (agregados finos ou filer) mais resistentes do que o primeiro material. Ao aproximar-se dessas partículas mais resistentes, a fenda não pode progredir porque o nível de tensão é insuficiente, ficando a fenda imobilizada (fixação da fenda) pelas inclusões mais resistentes existentes no mastique. A fenda só se propaga através dessas partículas quando o nível de tensão aumenta devido à ocorrência de pequenas fendas secundárias, com o conseqüente aumento da frente da fenda.

Bolk et al. (1982) também efectuaram um estudo para avaliar o efeito da natureza (por exemplo, calcária, granítica, entre outras) e do tipo (fraco ou médio, de acordo com a classificação holandesa) de filer nas propriedades mecânicas das misturas betuminosas mais utilizadas na Holanda. Os autores concluíram que o tipo e a natureza do filer desempenham uma importante função no comportamento das misturas betuminosas. Além disso, observaram que a quantidade de filer tem uma influência substancialmente menor que o teor em betume no comportamento das misturas betuminosas, para os limites utilizados nesse estudo (5 a 10% de filer e 4,0 a 6,5% de betume), embora os resultados dos diversos ensaios também estivessem submetidos, geralmente, à influência do tipo e natureza do filer.

Harm and Hughes (1989), num trabalho sobre especificações e observação de pavimentos com base no seu desempenho, mais especificamente ao referirem-se à granulometria das misturas betuminosas, indicaram que a fracção que tem maior influência no comportamento da mistura betuminosa é aquela que se situa abaixo do peneiro #4, o que demonstra a importância de todos os agregados finos para um bom desempenho do pavimento.

O mesmo autor refere a importância de se controlar a relação filer/betume numa mistura betuminosa, para se garantir um adequado desempenho no pavimento. Cada mistura tem uma relação filer/betume óptima, que depende essencialmente do tipo de filer que se está a utilizar. Assim, é fundamental que se verifique o tipo de filer utilizado em obra, ao mesmo tempo que se deve controlar a relação filer/betume. A utilização de uma relação filer/betume inferior à óptima aumenta a tendência para a mistura betuminosa ter deformações permanentes, devido à existência de betume livre, reduzindo também a coesão e a resistência à tracção das misturas betuminosas. A influência da alteração da relação filer/betume na fadiga, no fendilhamento a baixas temperaturas e na sensibilidade à água é difícil de quantificar, dado que tanto pode melhorar como piorar estas características das misturas betuminosas.

Kandhal et al. (1998) utilizaram diferentes ensaios para caracterizar vários tipos filer, cujos resultados foram comparados com o comportamento de misturas betuminosas produzidas com esses filers. As principais propriedades avaliadas nos ensaios de caracterização do filer foram:

- volume de vazios Ridgen;
- granulometria;
- valor do azul-de-metileno;
- índices de plasticidade.

As misturas produzidas com os vários tipos de filer foram ensaiadas à fadiga e às deformações permanentes, utilizando os ensaios Superpave. A sensibilidade à água foi avaliada através do ensaio AASHTO T 283 e através do ensaio “wheel tracking” com imersão.

Os agregados finos, especialmente o filer, influenciaram o comportamento das misturas betuminosas dos seguintes modos:

- os agregados finos actuam, em parte, como aglutinante betuminoso, devendo observar-se se este aumento da quantidade de aglutinante (mastique betuminoso) não vai originar uma mistura muito rica em mastique, com potenciais problemas de deformações permanentes;
- alguns agregados finos têm uma acção considerável no endurecimento do betume quando se juntam para formar o mastique, o que pode originar um comportamento frágil da mistura betuminosa, com uma maior tendência para o fendilhamento;
- alguns agregados finos aumentam a sensibilidade à água das misturas betuminosas.

Assim, é fundamental que se caracterize adequadamente os agregados finos para evitar a ocorrência destes tipos de problemas nas misturas betuminosas. Kandhal et al. (1998) analisaram as propriedades do filer que estão directamente relacionadas com o desempenho das misturas betuminosas. O ensaio de azul-de-metileno conseguiu distinguir adequadamente o filer com um mau desempenho em relação às deformações permanentes e à sensibilidade à água, não havendo nenhuma propriedade do filer que se correlacionasse adequadamente com o fendilhamento por fadiga das misturas betuminosas.

Na sequência de alguns problemas observados em pavimentos em serviço, supostamente relacionados com o filer utilizado nas misturas betuminosas, Dukatz and Anderson (1980) estudaram a influência de diferentes tipos de filer no comportamento do mastique e das misturas betuminosas. Dukatz and Anderson (1980) observaram que diversos estudos se referiam a uma dupla função do filer:

- agregado que faz parte do esqueleto mineral da mistura betuminosa;
- elemento que compõe, juntamente com o betume, o aglutinante da mistura betuminosa, denominado de mastique.

Os mesmos autores determinaram as propriedades de cada filer, que foram relacionadas com o comportamento observado em ensaios mecânicos sobre misturas betuminosas. As conclusões desse estudo foram as seguintes:

- os vários tipos de filer têm um diferente poder de endurecimento do mastique;

- o tipo de filer tem uma influência reduzida na estabilidade e no volume de vazios obtidos no ensaio de Marshall;
- o ensaio de deformação permanente por compressão foi muito influenciado pelo tipo de filer.

Craus et al. (1981) avaliaram o efeito do filer na durabilidade das misturas betuminosas, tendo concluído que o filer tem um efeito significativo, que é normalmente manifestado após longos períodos de imersão (4 a 7 dias). As misturas com tipos de filer não activos deterioram-se rapidamente após estes períodos de imersão, enquanto que as misturas com tipos de filer activos mantêm uma elevada resistência conservada durante longos períodos de imersão. Assim, é possível melhorar o processo de selecção do filer de modo a considerar a durabilidade que o filer garante à mistura betuminosa, avaliada através da resistência conservada ao fim de determinado tempo de imersão.

Finalmente, deve referir-se o estudo efectuado por Kandhal (1981) sobre a influência que a utilização de um filer recuperado tem no comportamento das misturas betuminosas. À partida, a utilização de um filer recuperado (obtido por aspiração, durante a britagem de agregados a seco) apresenta grandes vantagens a nível ambiental, sendo que as novas directivas ambientais vão exigir, cada vez mais, a utilização destes materiais em detrimento de materiais “novos”.

Nesse estudo, depois de ter determinado as propriedades de filer e o comportamento de mastiques e misturas betuminosas produzidas com diferentes tipos de filer recuperado, Kandhal (1981) chegou às conclusões a seguir apresentadas.

- Alguns tipos de filer recuperado aumentam demasiado a viscosidade do mástico, o que origina problemas de compactação das misturas betuminosas. Para evitar problemas nas misturas betuminosas preparadas com estes tipos de filer é necessário limitar o volume de vazios de Ridgen ou a variação da temperatura de amolecimento do mástico em relação ao betume.
- Quando o volume de vazios de Ridgen excede determinados limites (por exemplo, os indicados por Harris and Stuart, 1995), a utilização de finos recuperados dá origem a misturas betuminosas com uma maior resistência à compactação.
- A utilização duma maior quantidade de finos recuperados aumenta a estabilidade de Marshall até determinado limite, correspondente ao momento em que se torna difícil a compactação da mistura betuminosa.

- Alguns finos recuperados têm um efeito prejudicial na resistência das misturas betuminosas à acção da água, que foi quantificada através do ensaio de sensibilidade à água do *Asphalt Institute* e através do ensaio *Idaho*.
- Em alguns casos observou-se uma degradação prematura de pavimentos onde se aplicaram misturas betuminosas produzidas com filer recuperado. Normalmente, os problemas estavam associados à incorporação desse tipo de filer em elevadas quantidades, o que tornava a mistura betuminosa mais frágil e difícil de compactar. Também se observaram alguns casos de reduzida durabilidade e de problemas devido a uma maior sensibilidade à água das misturas betuminosas.

Depois de se terem referido os principais estudos efectuados sobre o comportamento do mastique e dos seus componentes (filer e betume) e sobre a influência que estes têm no comportamento das misturas betuminosas, nas próximas secções apresentam-se os principais trabalhos sobre a ligação agregado-mastique e sobre a forma como esta pode ser avaliada.

3.5. Mecanismos de Ligação e Rotura da Ligação Agregado-Mastique

Uma mistura betuminosa pode ser visualizada como uma estrutura na qual os agregados maiores, menores e finos, estão envolvidos ou suspensos no meio do betume. O betume pode penetrar nos poros e interstícios dos agregados. Os locais electricamente activos dos agregados atraem as moléculas mais polares do betume, que têm maior capacidade de ligação no contacto inicial (Curtis et al., 1993).

Cada molécula de betume está em contacto com a superfície dum agregado ou com outra molécula de betume próxima da superfície dum agregado. Os agregados finos encontram-se dispersos no meio do betume, formando um material aglutinante, denominado de mastique betuminoso.

Nesta estrutura da mistura betuminosa, a ligação agregado-mastique é um fenómeno complexo relacionado com a capacidade do mastique se ligar aos agregados, e manter-se ligado a estes em diversas condições de serviço (por exemplo, na presença de água). A ligação agregado-mastique caracteriza-se pela sua resistência mecânica, que depende das forças de interacção na interface entre o mastique e os agregados e da coesão interna do mastique.

Nesta secção referem-se os fenómenos que promovem a ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas, ou seja, os mecanismos de ligação entre o mastique e os agregados, assim como os fenómenos que diminuem a resistência da ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas.

Durante o processo de mistura a quente, os componentes do betume entram em contacto e aderem à superfície dos agregados, com os constituintes mais polares do betume (os componentes que contêm heteroátomos de enxofre, nitrogénio ou oxigénio) a serem os mais competitivos pelos locais activos na superfície dos agregados (os locais que contêm moléculas metálicas carregadas electricamente). Depois deste contacto inicial com os agregados, as moléculas de betume mantêm-se estacionárias (Curtis et al., 1993).

Apesar da ligação entre o betume e os agregados também ser uma estrutura química, esta é essencialmente uma estrutura física que resulta de interacções electrostáticas, dipolo-dipolo ou Van der Waals (Curtis et al., 1993).

Os mesmos autores referem que as propriedades electro-cinéticas dos agregados, assim como a sua capacidade de doar e aceitar electrões, variam de acordo com o tipo de moléculas metálicas activas existentes na superfície dos agregados. Os locais com essas moléculas metálicas activas promovem a adsorção dos componentes do betume na superfície dos agregados.

Depois de avaliarem as ligações químicas entre o betume e os agregados, Curtis et al. (1993) demonstraram que os agregados são mais influentes do que o betume, quer para garantir uma ligação agregado-mastique adequada, quer para evitar a perda de ligação na presença de água.

Efectivamente, a natureza dos agregados tem uma influência considerável na ligação agregado-mastique. Os agregados com um alto conteúdo em óxido de sílica, ou seja, os agregados ácidos (por exemplo, o granito) são mais difíceis de envolver com betume do que os agregados básicos (por exemplo, o basalto). No entanto, o betume liga-se bem à maioria dos agregados usados em pavimentação desde que eles estejam limpos e secos.

Quando os agregados estão cobertos por pó (finos aderentes aos agregados), pode alterar-se a estrutura química da ligação agregado-mastique, devido à fraca adesividade entre o pó e a superfície dos agregados. De facto, o betume liga-se preferencialmente ao pó que, por sua

vez, não se consegue ligar aos agregados, levando à anulação das forças adesivas que mantêm a mistura betuminosa coesa.

Quando se estabelece de uma boa ligação entre os agregados (finos e grossos) e o betume, no contacto inicial que sucede durante a fase de mistura, é difícil ocorrerem degradações na mistura betuminosa devido à rotura da ligação agregado-mastique. A rotura de ligações já formadas é normalmente denominada “descolagem” (*Stripping* na terminologia inglesa) e é originada pelo deslocamento do betume que se encontrava ligado à superfície dos agregados.

Quando o pavimento está em serviço, determinados factores podem alterar o comportamento da ligação agregado-mastique, dos quais se pode referir, essencialmente, o envelhecimento do betume e a presença de água nas misturas betuminosas.

O envelhecimento do betume pode influenciar a ligação entre o betume e os agregados devido às alterações na composição química do betume na interface com os agregados. Os componentes do betume tipicamente formados durante o envelhecimento são os sulfóxidos¹⁶, os ácidos carboxílicos¹⁷ e as cetonas¹⁸.

Curtis et al. (1993) observaram que os grupos funcionais polares do betume fortemente adsorvidos nos agregados incluem os sulfóxidos, os ácidos carboxílicos, as bases de nitrogénio e os fenóis, enquanto que as moléculas menos polares (como os pirróis e as cetonas) e as moléculas não polares são muito menos adsorvidas, não competindo pela superfície dos agregados.

Ao mesmo tempo, as moléculas mais polares do betume (sulfóxidos e ácidos carboxílicos) são prontamente dissolvidas, em quantidades significativas, pela presença de água (originando a rotura dos agregados), enquanto que as bases de nitrogénio e os fenóis são mais resistentes à dissolução aquosa.

Assim, as fracções do betume que aderem melhor aos agregados durante a produção da mistura betuminosa, também são aquelas que mais facilmente perdem a ligação

¹⁶ Composto caracterizado pela existência de enxofre ligado a átomos de oxigénio.

¹⁷ Designativo dos ácidos orgânicos caracterizados pela presença, nas suas moléculas, de um ou mais carboxilos (grupo característico ou funcional, de fórmula COOH, que confere propriedades ácidas).

¹⁸ Função orgânica caracterizada pela existência de carbono secundário ligado a um átomo de oxigénio.

agregado-mastique na presença de água, acontecendo o mesmo com as moléculas formadas durante o envelhecimento do betume.

Curtis et al. (1993) indicam que a rotura da ligação agregado-mastique se deve, principalmente, à intrusão de água na mistura betuminosa. Esta água pode encontrar-se na mistura betuminosa pelo facto dos agregados estarem molhados antes de serem misturados com o betume, ou pode surgir depois das misturas betuminosas serem colocadas no pavimento, devido à ocorrência de precipitação.

No passado, efectuou-se um grande número de estudos (Hughes et al., 1960; Asphalt Institute, 1981; Taylor and Khosla, 1983) para determinar os mecanismos de rotura de ligação entre o betume e os agregados, concluindo-se que:

- quando os agregados estão limpos e secos e a mistura betuminosa é impermeável, o modo de rotura é, geralmente, coesivo (perda de ligação interna no betume);
- na presença de água, é muito provável que o modo de rotura seja interfacial (perda de ligação na interface entre o betume e os agregados).

O Asphalt Institute (1981) refere que os principais mecanismos de rotura de ligação entre o betume e os agregados, descritos em seguida, podem ocorrer associados ou isoladamente numa mistura betuminosa.

- *Deslocação*: A teoria da deslocação surge da consideração do equilíbrio termodinâmico dum sistema de três fases: betume, agregado e água. Se for introduzida água numa interface betume/agregado, a consideração das energias de superfície envolvidas mostra que o betume retrai ao longo da superfície do agregado. A Figura 3.1 mostra um agregado embutido num filme de betume com o ponto A representando a posição de equilíbrio quando o sistema está seco. Em contacto com água, o ponto de equilíbrio move-se, e a nova interface retrai ao longo da superfície para o ponto B. A nova posição de equilíbrio tem um ângulo de contacto que depende da viscosidade e do tipo de betume utilizado.
- *Separação*: A separação acontece quando o betume e os agregados estão separados por uma fina camada de água ou pó, embora nenhuma fractura visível na superfície da camada de betume seja aparente. Embora o filme de betume envolva completamente o agregado, não existe nenhuma ligação adesiva entre eles, e o betume pode ser descolado facilmente da superfície do agregado. Este processo é reversível, ou seja, se a água for removida o betume pode voltar a aderir ao agregado.

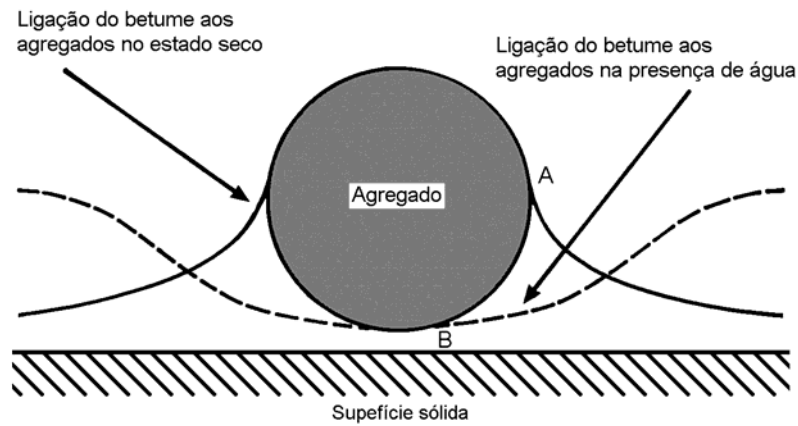


Figura 3.1 – Retracção da interface entre o betume e o agregado na presença de água
(Asphalt Institute, 1981)

- *Empolamento e escavação*: Quando a temperatura do betume num pavimento aumenta, a viscosidade do betume reduz. Se isto for associado a uma chuva recente, o betume pode subir pelas extremidades das gotas de água para formar uma bolha, como se mostra na Figura 3.2. Se a temperatura aumentar, a bolha ir-se-á expandir e deixará uma cova que pode permitir o acesso da água à superfície dos agregados.

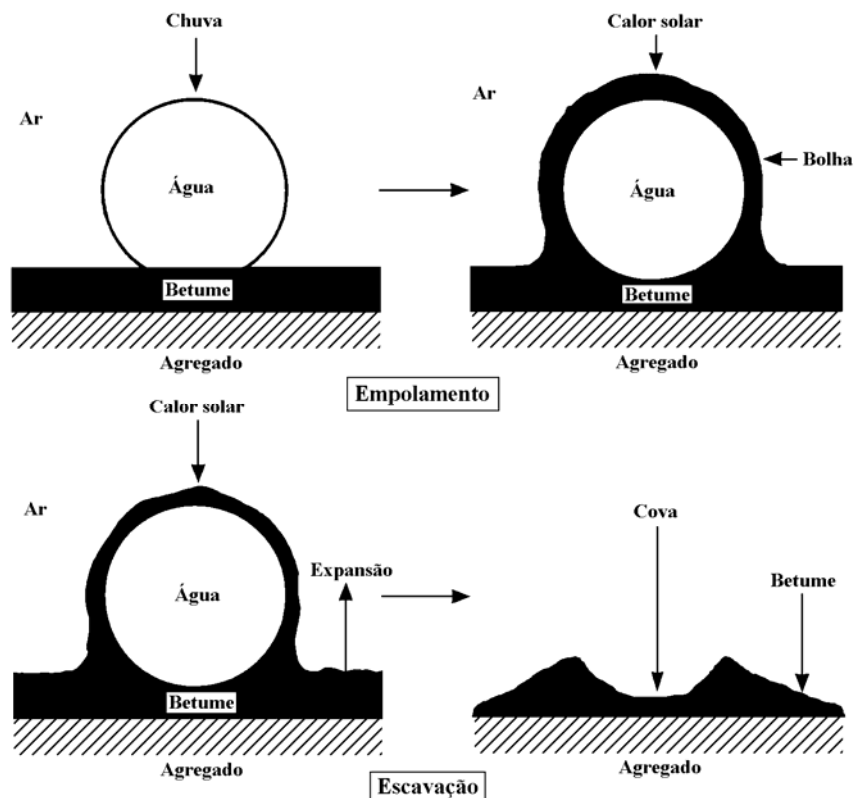


Figura 3.2 – Formação de bolhas e covas numa mistura betuminosa devido à presença de água (Whiteoak, 1990)

- *Rotura do filme de betume:* A rotura do filme acontece quando o betume envolve completamente os agregados, mas em extremidades afiadas ou em asperezas dos agregados onde o filme de betume é mais fino e a água pode penetrar pelo filme de betume para alcançar a superfície dos agregados. Este movimento de água para a superfície dos agregados pode acontecer com a água em estado líquido ou gasoso. Depois de iniciado este processo é possível que a água se disperse na interface entre o betume e os agregados, descolando o filme de betume. A velocidade com que a água pode penetrar e separar o filme de betume depende da viscosidade do betume, da natureza da superfície dos agregados, da espessura do filme de betume e da presença de filler e outros componentes, como agentes activos de superfície. Depois de ocorrer uma separação significativa entre o filme de betume e os agregados, as tensões impostas pelo tráfego rompem rapidamente o filme de betume, que se retrai, expondo os agregados cobertos por água.
- *Desgaste hidráulico:* O desgaste hidráulico é causado pela acção dos pneus dos veículos numa superfície dum pavimento saturada em água. A água pode ser empurrada para dentro dos vazios existentes na superfície do pavimento, devido à pressão exercida pelos pneumáticos dos veículos. Depois de passar, a acção do pneu aspira a água existente nestes vazios e induz um movimento de água cíclico, que pode originar a perda de ligação entre o betume e os agregados. Eventualmente, os finos suspensos na água podem agir como um abrasivo e podem acelerar a perda de adesividade.
- *Pressão intersticial:* Este mecanismo de rotura de ligação é muito importante em misturas betuminosas abertas ou mal compactadas. Nestes tipos de misturas betuminosas, a água existente nos poros pode passar a fazer parte da mistura betuminosa conforme esta vai sendo pós-compactada pelo tráfego. Uma vez que a mistura betuminosa se torne efectivamente impermeável, o tráfego subsequente induz uma pressão de água nos poros. Assim, criam-se canais hidráulicos que envolvem as ligações betume/agregados, e que conduzem à rotura dessas ligações. Quando a água que ficou dentro da mistura betuminosa é submetida a temperaturas elevadas, surgem tensões de expansão que aceleram a migração da água e podem originar a rotura de ligação entre o betume e os agregados. As baixas temperaturas podem conduzir à formação de gelo, que, ao expandir-se, é igualmente destrutivo.
- *Descolagem química:* A difusão de água pelas camadas de betume pode conduzir ao aparecimento de camadas de água na superfície dos agregados. A presença da água obriga a superfície do agregado a adoptar uma carga de superfície negativa contra uma carga ligeiramente negativa do betume. Em contacto, estas duas superfícies carregadas negativamente resultam numa repulsão de líquidos. Quanto mais água for atraída para a

superfície dos agregados, maior será a força de repulsão e mais facilmente ocorrerá a rotura da ligação entre o betume e os agregados.

Mais recentemente, Curtis et al. (1993) referem que os modos de rotura de ligação entre o betume e os agregados são vários e dependem do carácter do sistema composto pelo betume e pelos agregados. Os modos de rotura mais importantes são:

- separação da ligação na interface entre o betume e os agregados;
- rotura no próprio betume, quando são removidos os seus componentes solúveis;
- rotura coesiva nos agregados;
- separação dos componentes do betume, quando a presença de água aumenta a solubilidade dos componentes polares do betume (que promoviam a ligação aos agregados), por ligação com o hidrogénio.

A uma escala macroscópica, a rotura da ligação agregado-mastique também pode ser interfacial ou coesiva, quer no mastique, quer nos agregados. A rotura interfacial é originada por problemas de ligação na interface entre o mastique e os agregados. A rotura coesiva acontece devido a problemas de união interna no mastique ou nos agregados na zona de ligação entre o betume e os agregados.

Habitualmente, a superfície dos agregados está carregada electricamente. Por exemplo, a sílica, que é um componente comum de pedras ígneas, possui uma fraca carga negativa de superfície que resulta da presença, à superfície, de átomos de oxigénio que não estão totalmente carregados electricamente.

A ligação química entre o betume e a superfície dos agregados (carregada electricamente) deve-se, principalmente, à reduzida força de dispersão entre eles. Por sua vez, a água, que é muito polar, é fortemente atraída para a superfície dos agregados por forças de orientação. A superfície dos agregados é, mais ou menos, hidrófila (liga-se bem à água) e oleofóbica (não se liga facilmente aos óleos). Os agregados ácidos são mais hidrófilos que os agregados básicos, ou seja, estão mais sujeitos à perda de adesividade devido à presença de água nas misturas betuminosas.

Se a superfície de um agregado está molhada, é quase impossível dispersar a água com o betume, de modo a que este adira ao agregado. Deste modo, durante a fase de mistura, a

presença de água nos agregados dificulta o seu envolvimento pelo betume e a manutenção duma adequada ligação entre o betume e os agregados.

Pelo contrário, é possível e bastante mais fácil para a água penetrar num filme de betume e separá-lo dos agregados. A explicação para este facto resulta das propriedades fundamentais do sistema de betume, agregados e água, que corresponde ao comportamento de dois líquidos sobre uma superfície. O deslocamento de um líquido por outro numa superfície sólida é o resultado das forças que actuam nas zonas de contacto entre os dois líquidos e a superfície sólida. Na Figura 3.3 apresentam-se as condições existentes quando um sólido já está molhado por água e se introduz betume nesse sistema.

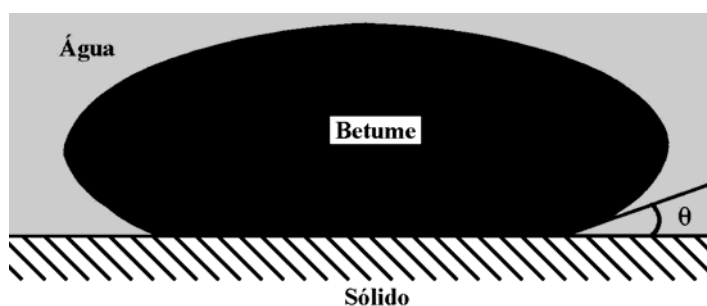


Figura 3.3 – Diagrama duma gota de betume aplicada a uma superfície sólida debaixo de água (Whiteoak, 1990)

Se o ângulo de contacto entre as três fases é θ e as energias das interfaces sólido/betume, sólido/água e betume/água são respectivamente γ_{sb} , γ_{sw} e γ_{bw} , então, o trabalho para deslocar a água de uma área unitária de sólido é determinado pela Equação 3.1 (Whiteoak, 1990):

$$W = \gamma_{sb} + \gamma_{bw} - \gamma_{sw} \quad (3.1)$$

Para alcançar o equilíbrio, a equação de Young e Dupre (Equação 3.2) deve ser satisfeita.

$$\gamma_{sb} = \gamma_{sw} + \gamma_{bw} \times \cos \theta \quad (3.2)$$

Resultando:

$$W = \gamma_{bw} \times (1 + \cos \theta) \quad (3.3)$$

Assim, o trabalho para deslocar a água de uma área unitária de sólido (W) é função da energia interfacial betume/água (γ_{bw}) e do ângulo de contacto entre as três fases (θ).

Uma redução em γ_{bw} e um aumento em θ melhora a ligação agregado-mastique, ao aumentar a energia necessária para a água separar o betume da superfície dos agregados. Na base de um betume, θ é sempre inferior a 90° e, assim, o factor $(1 + \cos \theta)$ é sempre superior a 1, ou seja, é exigida uma quantidade apreciável de trabalho para fazer o betume deslocar a água e, como resultado, o betume tende a agrupar-se em gotas na superfície de um agregado que não esteja seco.

Os valores de γ_{bw} e θ podem ser alterados adicionando certas substâncias químicas às misturas betuminosas. Quando um agente activo de superfície cationico¹⁹ é dissolvido no betume, ele é fortemente adsorvido na superfície do agregado. Assim, o ângulo de contacto aumenta e a energia interfacial entre o betume e a água reduz-se, o que facilita a dispersão da água pelo betume. O problema resultante do uso de um elemento aditivo químico na mistura betuminosa para reduzir a energia da interface água/betume, é que este aumenta a tendência do betume para formar uma emulsão na presença de água.

Se a camada impermeável de betume que envolve os agregados for contínua, a água só pode penetrar no sistema composto pelo betume e pelos agregados por difusão através da camada de betume, removendo ao longo do seu caminho os componentes de betume que são solubilizados. No entanto, se ocorrerem fendas na camada de betume, a água pode introduzir-se na interface entre o betume e os agregados, causando uma rotura interfacial.

O envolvimento completo dos agregados por uma camada de betume reduz os efeitos que a água tem na degradação das misturas betuminosas. Neste contexto, a utilização de misturas betuminosas com uma porosidade reduzida, em estradas com boa drenagem, tem uma grande influência na redução dos danos devidos à água, ao limitar a exposição da interface entre o betume e os agregados à presença de água.

A separação do betume dos agregados pode ocorrer, sobretudo, em misturas betuminosas permeáveis a água, havendo poucos riscos de “descolagem” em misturas betuminosas densas.

¹⁹ Agente iónico de carga eléctrica positiva que, durante uma electrólise, se dirige para o cátodo.

A ocorrência de “descolagem” em misturas betuminosas permeáveis à água manifesta-se, nos casos mais graves, na desagregação generalizada da superfície do pavimento, devido à perda de coesão interna das misturas betuminosas.

A possibilidade de ocorrer a rotura de ligação agregado-mastique depende da afinidade entre o betume e os agregados e, ao mesmo tempo, da resistência da ligação agregado-mastique à “descolagem” na presença de água (sensibilidade à água da mistura betuminosa).

No entanto, a experiência acumulada durante muitos anos demonstrou que as misturas betuminosas produzidas com agregados com uma fraca afinidade ao betume não deixam de ter um comportamento satisfatório no pavimento, desde que sejam aplicadas em locais com condições climáticas pouco severas.

O estudo de Hargreaves et al. (1985), sobre problemas de degradação prematura em camadas de desgaste realizadas com misturas betuminosas, demonstrou que vários casos de degradação prematura eram causados pela rotura da ligação agregado-mastique. A observação de vários pavimentos permitiu reconhecer que a rotura da ligação agregado-mastique em misturas betuminosas com agregados duros, de baixa qualidade e com uma reduzida afinidade ao betume conduzia a uma desagregação prematura e generalizada da superfície do pavimento.

Whiteoak (1990) realizou um estudo para avaliar a influência de diversos parâmetros (especialmente o tipo de filer) na rotura da ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas. Os resultados desse estudo são apresentados na Figura 3.4, onde se pode observar a variação da estabilidade de Marshall conservada²⁰ em função da quantidade de água absorvida durante 4 dias de condicionamento em água a 60 °C.

O gráfico mostra a importância do tipo de filer e da quantidade de água absorvida pela mistura betuminosa na perda de ligação agregado-mastique. A quantidade de água absorvida depende da porosidade da mistura betuminosa. Para determinada porosidade, a quantidade de água absorvida é significativamente reduzida se o filer for calcário, e ainda mais reduzida quando se adiciona cal hidráulica à mistura betuminosa (tratamento anti-descolagem²¹).

²⁰ A estabilidade de Marshall conservada é a razão entre a estabilidade obtida no ensaio de Marshall em provetes submetidos a um condicionamento em água (neste caso, 4 dias em água a 60 °C) e a estabilidade obtida em provetes da mesma mistura betuminosa que não tiveram nenhum tipo de condicionamento.

²¹ Ver Secção 3.8.

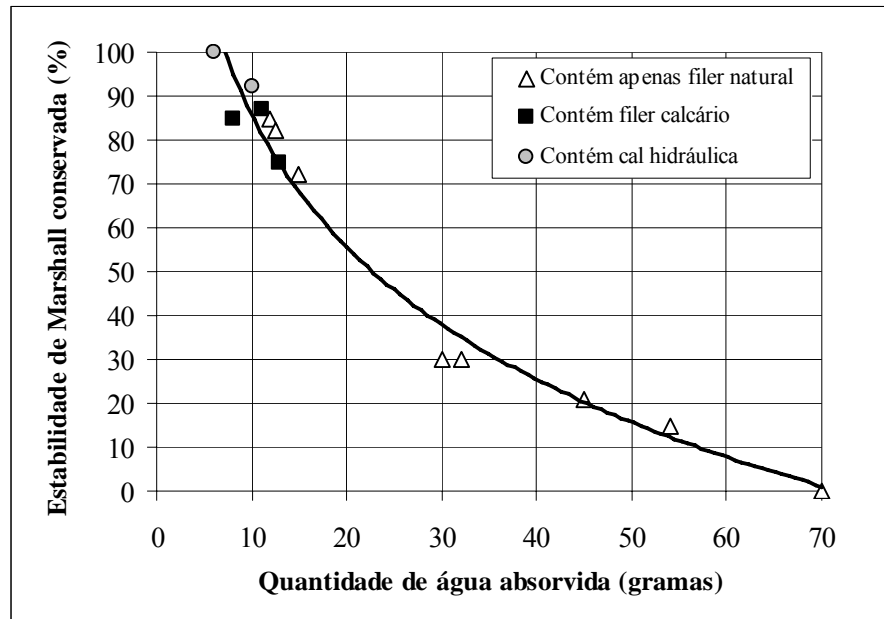


Figura 3.4 – Efeito da absorção de água e da adição de cal hidráulica na estabilidade de Marshall conservada após condicionamento (adaptado de Whiteoak, 1990)

No mesmo estudo, Whiteoak observou que em determinadas situações (estabilidade de Marshall conservada inferior a 30%) o volume de água absorvida foi superior à porosidade da mistura betuminosa. Na opinião do autor, isto sugere que alguns tipos de rotura, que aparentemente ocorrem devido à rotura da ligação agregado-mastique, podem, de facto, ser originados por uma alteração da estrutura interna da mistura betuminosa.

Os factores que influenciam a ligação agregado-mastique são numerosos e complexos, mas considera-se que aproximadamente 80% são controláveis nas fases de produção das misturas betuminosas e de construção do pavimento. Esses factores são apresentados no Quadro 3.1, destacando-se aqueles que estão relacionados com as propriedades dos agregados, nomeadamente: i) a composição mineralógica; ii) a natureza físico-química; iii) a forma e a estrutura; iv) a carga eléctrica superficial.

A influência da mineralogia dos agregados na ligação agregado-mastique é difícil de generalizar, dado que o tamanho, forma e textura dos agregados também são factores combinados com bastante influência nessa ligação. Porém, a maioria das degradações causadas por perda de ligação agregado-mastique está associada a agregados siliciosos como os granitos, os riólitos e os quartzitos, entre outros.

Quadro 3.1 – Propriedades dos materiais e influências externas que afectam a ligação agregado-mastique (Whiteoak, 1990)

Propriedades dos agregados	Propriedades do betume	Propriedades da mistura betuminosa	Influências externas
<ul style="list-style-type: none"> - Mineralogia - Textura da superfície - Presença de pó - Carga eléctrica superficial - Porosidade - Durabilidade e Desgaste - Área superficial - Absorção e Teor em água - Forma e Estrutura interna 	<ul style="list-style-type: none"> - Reologia - Polaridade eléctrica - Constituição - Envelhecimento 	<ul style="list-style-type: none"> - Porosidade - Teor em betume - Espessura da camada de betume - Tipo de filer - Granulometria dos agregados - Tipo de mistura betuminosa 	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitação - Água - pH da água - Presença de sais - Temperatura - Ciclos de temperatura - Tráfego - Fase de espalhamento - Drenagem

A possibilidade de obter um desempenho satisfatório com os agregados siliciosos ou de ocorrer a rotura de ligação agregado-mastique usando agregados com uma boa resistência à descolagem (por exemplo, o calcário), demonstra a complexidade do fenómeno de ligação agregado-mastique (Whiteoak, 1990).

A carga eléctrica superficial dum agregado demonstrou ser um importante factor que influencia a ligação agregado-mastique (Orchard, 1976). Os agregados com cargas eléctricas superficiais desequilibradas possuem energia de superfície. Neste contexto, se a superfície dos agregados for coberta com um líquido de polaridade oposta, a procura de energia superficial recíproca pode ser satisfeita resultando numa ligação adesiva entre o agregado e o líquido. Na presença de duas fases líquidas (por exemplo, betume e água), o líquido que pode satisfazer melhor a exigência de energia (ou seja, o líquido com polaridade oposta à energia superficial do agregado) vai aderir com mais tenacidade ao agregado.

Assim, o fenómeno de descolagem do betume da superfície dos agregados na presença de água pode ser relacionado com as cargas de superfície, dado que, habitualmente, a água equilibra a carga de superfície dos agregados melhor que o betume.

A adsorção físico-mecânica do betume nos agregados depende ainda de outros factores, entre os quais se pode enumerar: i) o volume total de poros permeáveis; ii) a largura das aberturas dos poros; iii) a viscosidade e a tensão superficial do betume.

A presença de uma micro-estrutura de poros, vazios e micro-fendas pode provocar um aumento significativo na superfície disponível para os agregados adsorverem o betume. Scott

(1978) demonstrou que as várias fracções do betume são fortemente adsorvidas na superfície dos agregados para uma distância de aproximadamente 180 angström.

Outros factores que afectam a ligação agregado-mastique inicial, e a subsequente manutenção dessa ligação em serviço, são a textura da superfície dos agregados, a presença de pó a envolver os agregados e o pH da água quando em contacto com a interface betume/agregado. Habitualmente, os agregados com superfícies mais ásperas garantem um melhor comportamento da ligação agregado-mastique. De facto, uma boa ligação mecânica alcançada em agregados ásperos pode ser mais importante que a sua mineralogia para manter a ligação agregado-mastique.

Como se indicou no Quadro 3.1, as propriedades do betume também são importantes para a obtenção, e subsequente manutenção, duma ligação agregado-mastique resistente. Em particular, a viscosidade do betume na fase de produção e após envelhecimento em serviço, a polaridade e a composição química do betume influenciam as características da ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas. Porém, as características dos agregados são, sem dúvida, os factores mais influentes na resistência da ligação agregado-mastique.

Na próxima secção deste trabalho analisam-se, com mais detalhe, os principais factores que determinam o comportamento da ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas em serviço, ou seja, o envelhecimento do betume e a presença de água nas misturas betuminosas.

3.6. Factores Determinantes no Comportamento da Ligação Agregado-Mastique em Serviço

3.6.1. Envelhecimento do Betume

O envelhecimento do betume resulta de mudanças de composição química e reológica no betume. Por enquanto, essas mudanças ainda não são claramente compreendidas, principalmente porque o betume é uma mistura bastante complexa de moléculas orgânicas que variam amplamente na sua composição. De facto, entre quase 1500 exemplares de petróleo de diferentes origens, não existem dois rigorosamente semelhantes.

Porém, muitos investigadores, entre os quais Welborn (1984), Bell (1989) e Von Quintus et al. (1991), estudaram o envelhecimento de betumes e misturas betuminosas, garantindo avanços significativos para uma melhor compreensão dos mecanismos de envelhecimento.

Como se pode observar no Quadro 3.2, Traxler (1963) identificou 15 efeitos que podem alterar as características químicas e reológicas do betume, assim como as suas propriedades de ligação. No mesmo quadro são fornecidas soluções experimentais para retardar alguns dos efeitos, mas observa-se que a outros não foi dada nenhuma consideração experimental.

Quadro 3.2 – Efeitos que podem alterar as propriedades de ligação do betume (Traxler, 1963)

Efeitos	Influenciados por					Ocorre		Formas de retardar
	Tempo	Calor	Oxigénio	Luz solar	Raios beta e gama	À superfície	Em massa	
1. Oxidação (no escuro)	X	X	X			X		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Atmosfera inerte ▪ Inibidores de radicais livres
2. Fotooxidação (luz directa)	X	X	X	X		X		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protecção da luz ▪ Atmosfera inerte ▪ Inibidores de radicais livres
3. Volatilização	X	X				X	X	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protecção do calor
4. Fotooxidação (luz reflectida)	X	X	X	X		X		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protecção da luz ▪ Atmosfera inerte ▪ Inibidores de radicais livres
5. Reacções químicas na presença de luz directa	X	X		X		X		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protecção da luz ▪ Aditivos
6. Reacções químicas na presença de luz reflectida	X	X		X		X	X	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Protecção da luz ▪ Aditivos
7. Polimerização	X	X				X	X	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Inibidores de radicais livres
8. Desenvolvimento duma estrutura interna	X	X				X	X	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adicionar agentes de dispersão ▪ Alterar a origem e o processamento do betume
9. Exsudação de óleo	X	X				X		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduzir o teor em parafina
10. Alterações por energia nuclear	X	X			X	X	X	
11. Acção da água	X	X	X	X		X		<ul style="list-style-type: none"> ▪ Alterar a origem e o processamento do betume
12. Absorção pelos sólidos	X	X				X	X	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Melhorar a dispersão do betume
13. Adsorção de componentes à superfície dos sólidos	X	X				X		
14. Reacções químicas ou efeitos catalíticos à superfície	X	X				X	X	
15. Deterioração microbiológica	X	X	X			X	X	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Adicionar agentes fungistáticos e bacteriostáticos

Os efeitos não foram apresentados pela ordem de importância, observando-se que o tempo, a temperatura e a espessura de filme de betume (envelhecimento à superfície) influenciam todos os efeitos.

A durabilidade do betume é caracterizada pelas suas propriedades físicas, que por sua vez se relacionam directamente com a sua composição química. O conhecimento do modo como as alterações químicas do betume afectam as suas propriedades físicas é fundamental para compreender os factores que controlam a durabilidade do betume.

Assim, identificam-se três factores relacionados com a composição química do betume, que regulam as alterações causadoras do envelhecimento do betume nos pavimentos:

- perda dos componentes oleosos do betume por volatilização ou por absorção através de agregados porosos;
- mudanças na composição química das moléculas de betume através da reacção com oxigénio atmosférico;
- estruturação molecular que produz efeitos tixotrópicos²².

Dos três factores apresentados, a reacção com o oxigénio atmosférico é identificada como sendo, provavelmente, a principal e mais bem conhecida causa de envelhecimento. Em pavimentos onde existe betume em camadas finas expostas ao oxigénio atmosférico, acontece uma oxidação rápida e irreversível que resulta na formação de grupos químicos funcionais polares, que contêm oxigénio e têm uma forte interacção.

Estes grupos químicos funcionais polares aumentam significativamente a viscosidade do betume e alteram as suas propriedades complexas de deformação, um fenómeno que conduz, frequentemente, à fragilização do betume e, em última instância, à degradação do pavimento.

A Figura 3.5 indica as fórmulas estruturais das principais funcionalidades químicas existentes naturalmente nos betumes, e daquelas que são formadas durante o envelhecimento. Os grupos químicos funcionais formados no envelhecimento oxidativo incluem sulfóxidos, anidridos, ácidos carboxílicos e cetonas.

²² Propriedade que têm certas soluções (especialmente coloidais) de exibir uma viscosidade menor quando aumenta o gradiente de velocidade (e vice-versa) e, portanto, de poder passar a um estado de maior fluidez por agitação mecânica, sem variação de temperatura, voltando ao estado primitivo logo que acaba essa acção.

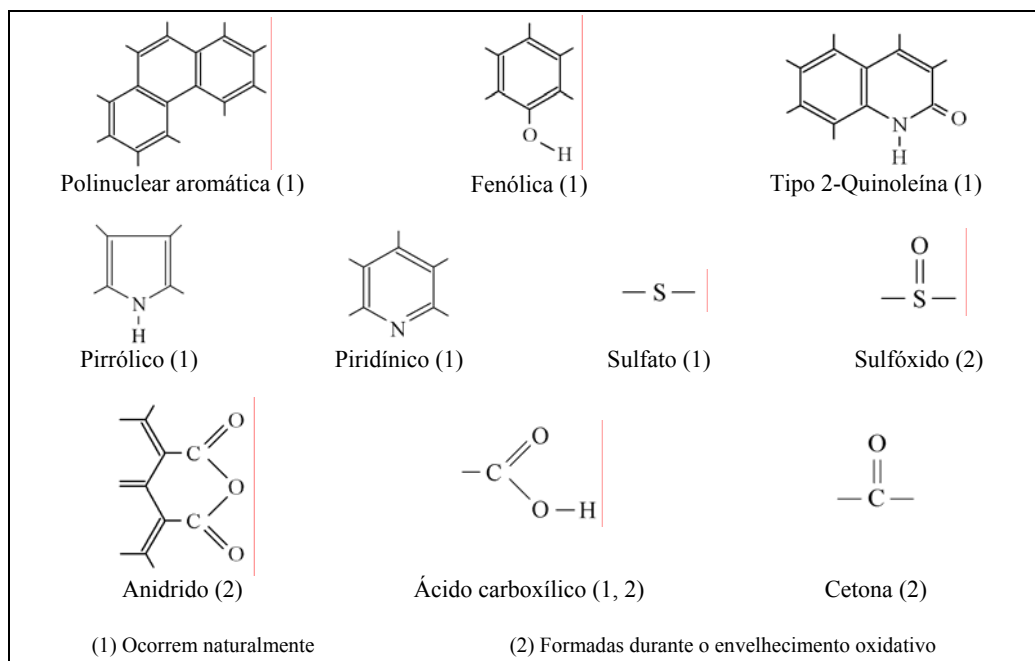


Figura 3.5 – Funcionalidades químicas nas moléculas de betume, normalmente presentes ou formadas durante o envelhecimento oxidativo (Scholz, 1995)

O Quadro 3.3 apresenta os resultados de ensaios realizados em quatro betumes obtidos de diferentes petróleos, e que foram envelhecidos em idênticas condições (130 °C, durante 24 horas e com uma espessura do filme de betume de 15 µm). Os resultados indicam que as cetonas e os sulfóxidos são os principais produtos de oxidação, enquanto os anidridos e os ácidos carboxílicos se formam em menores quantidades.

Quadro 3.3 – Grupos químicos funcionais formados no betume durante o envelhecimento oxidativo (Scholz, 1995)

Betume	Concentração (moles por litro)				Índice médio de envelhecimento ²³
	Cetona	Anidrido	Ácido Carboxílico	Sulfóxido	
B 1	0,50	0,014	0,008	0,30	38,0
B 2	0,55	0,015	0,005	0,29	27,0
B 3	0,58	0,020	0,009	0,29	132,0
B 4	0,77	0,043	0,005	0,18	30,0

Relativamente ao envelhecimento das diversas fracções do betume, o Quadro 3.4 apresenta os resultados que demonstram que a concentração de cetonas formadas no envelhecimento

²³ O índice de envelhecimento é a relação entre determinada propriedade física do betume (por exemplo, viscosidade, penetração ou temperatura de amolecimento) avaliada no betume envelhecido e “não envelhecido” (ver Equação 3.4).

oxidativo é maior nas fracções de asfaltenos e polar aromática, encontrando-se uma menor concentração nas fracções saturada e de nafteno aromático.

Quadro 3.4 – Grupos químicos funcionais formados nas fracções do betume durante o envelhecimento oxidativo (Scholz, 1995)

Fracção	Concentração (moles por litro)		
	Cetona	Anidrido	Ácido Carboxílico
Saturada	0,05	0,010	Vestígios
Aromática	0,32	0,017	-
Polar Aromática	1,48	0,088	-
Asfaltenos	1,82	0,080	Não determinada
Todo o betume	1,02	0,052	0,007

O facto das fracções de asfaltenos e polar aromática conterem as concentrações mais elevadas de sistemas de anéis aromáticos, justifica o maior envelhecimento dessas fracções, por terem um maior conteúdo em hidrocarbonetos sensíveis à oxidação atmosférica.

Embora os produtos de oxidação sejam um factor importante no envelhecimento, o envelhecimento não se relaciona directamente com a concentração em produtos de oxidação (Petersen et al., 1994).

Os componentes sem capacidade de associação no meio solvente podem ser muito eficazes na dispersão de moléculas polares debilmente associadas, formadas por oxidação, o que resulta num betume bastante oxidado que não demonstra uma grande mudança de rigidez. Reciprocamente, uma pequena mudança de rigidez pode ser o resultado da formação de moléculas polares fortemente associadas cuja dispersão é feita por componentes não associados dum meio solvente com uma fraca capacidade de dispersão. Assim, o grau de endurecimento (aumento de rigidez) é o resultado da polaridade total associada formada no betume, da resistência das associações das moléculas polares e da capacidade de dispersão dos componentes não associados do meio solvente (Branthaver et al., 1994).

O envelhecimento oxidativo requer a presença de oxigénio. Assim, em pavimentos que têm porosidade reduzida (ou permeabilidade muito baixa), não é provável que o envelhecimento oxidativo afecte significativamente as propriedades reológicas do betume.

A estruturação molecular²⁴, um fenómeno lento e bastante reversível que parece acontecer ao mesmo tempo e em sinergia com o envelhecimento oxidativo, pode produzir mudanças nas propriedades de deformação de um betume, sem mudar a sua composição química. Por conseguinte, pode ser um factor que contribui significativamente para o envelhecimento do betume e, ao mesmo tempo, para uma redução na adesividade das misturas betuminosas. No entanto, este fenómeno é difícil de quantificar, uma vez que os processos de recuperação do betume (ou seja, o uso de solventes, calor e processamento mecânico para obter o betume a partir de misturas de betuminosas) destroem quase toda a estruturação molecular.

A perda de componentes voláteis (ou seja, as fracções não polares saturadas ou oleosas do betume) acontece durante a produção, armazenamento, transporte e espalhamento das misturas betuminosas (ou seja, enquanto o betume está numa fina camada e a uma temperatura elevada). Também pode acontecer devido à absorção dos componentes polares pelos agregados porosos. Com as especificações e as práticas construtivas actuais, a volatilização não tem, normalmente, uma contribuição significativa para o envelhecimento dos betumes. Whiteoak (1990) refere que os betumes não modificados são pouco voláteis e, então, o endurecimento resultante da perda de voláteis é normalmente reduzido.

A absorção dos componentes polares do betume pelos agregados porosos, é um processo irreversível que resulta numa mudança da composição do betume que pode afectar significativamente as suas propriedades e características de envelhecimento. Traxler (1963) sugere que as reacções químicas ou os efeitos catalíticos²⁵ na interface do betume com os agregados podem, em certas situações, mudar as propriedades do betume o suficiente para afectar o seu comportamento em serviço, especialmente a ligação mastique-agregados.

A presença de água também pode afectar seriamente o comportamento e a durabilidade das misturas betuminosas utilizadas em pavimentação. Porém, embora as degradações originadas pela presença de água possam ser relacionadas com a composição do betume e com a adsorção de componentes do betume pela superfície dos agregados, estas são principalmente um fenómeno de interface, descrito em pormenor na Secção 3.6.2.

²⁴ Envelhecimento causado pelo arranjo espacial dos átomos numa molécula de betume em estruturas de maiores dimensões, sem alteração da sua composição química.

²⁵ Efeitos provocados por substâncias que modificam a velocidade das reacções químicas, apresentando-se inalteradas no fim da reacção.

Consequências do envelhecimento

O envelhecimento dos ligantes utilizados em misturas betuminosas resulta de mudanças de composição do betume que causam um aumento na sua viscosidade. A Figura 3.6 (Scholz, 1995) ilustra a curva hiperbólica de aumento da viscosidade ao longo do tempo, determinada em ensaios conduzidos a uma velocidade de aplicação de corte de $0,05 \text{ s}^{-1}$ e a 25 °C , para uma série de diferentes betumes em serviço. Nessa figura pode observar-se que a viscosidade dos betumes aumentou drasticamente (duas ordens de grandeza) durante quase 10 anos de serviço.

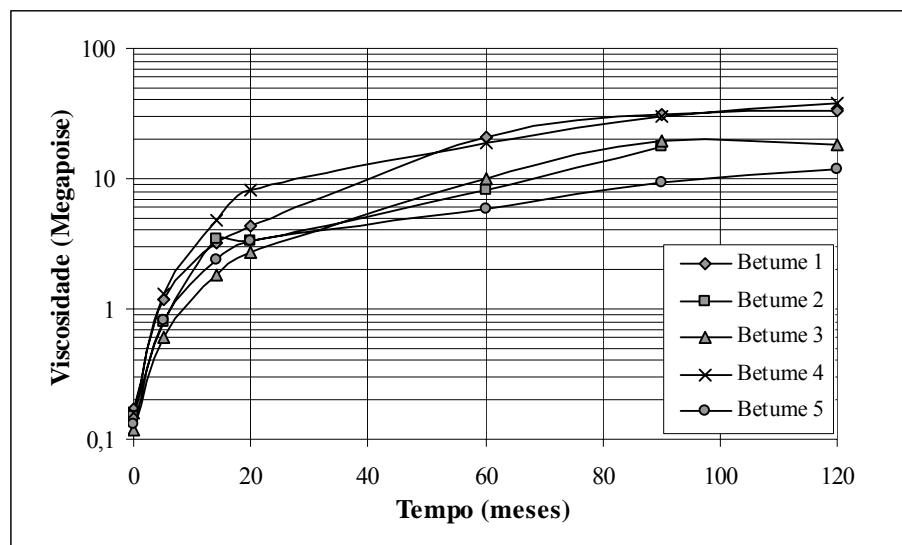


Figura 3.6 – Alteração hiperbólica da viscosidade (envelhecimento) em vários betumes durante o tempo de serviço no pavimento (Scholz, 1995)

Após envelhecimento, o betume pode transformar-se num material frágil, com capacidade de deformação significativamente reduzida, o que contribui para o fendilhamento das misturas betuminosas e para a fragilização das ligações entre o betume e os agregados.

O fendilhamento das misturas betuminosas acontece, principalmente, por um dos seguintes motivos: i) tensões de tracção por flexão das camadas betuminosas do pavimento; ii) tensões de tracção devido a acções térmicas; iii) propagação de fendas; iv) tensões de tracção no contacto pneu/pavimento (fendilhamento com origem na superfície).

O fendilhamento devido à flexão ocorre por fadiga das misturas betuminosas devido à aplicação de cargas repetidas dos veículos, que originam tensões de tracção na parte inferior das camadas betuminosas.

O fendilhamento devido às variações térmicas resulta de tensões de tracção induzidas termicamente que excedem a resistência à tracção da mistura betuminosa. O fendilhamento térmico pode acontecer quando a temperatura da mistura betuminosa diminui abaixo do limite inferior de fractura do betume (ponto de fragilidade de Fraass) ou como resultado duma acumulação de extensão permanente de tracção devido à acção de tensões térmicas repetidas.

A propagação de fendas acontece em reforços de pavimentos já fendilhados. As fendas no reforço aparecem directamente sobre as fendas do pavimento antigo e acontecem, geralmente, como o resultado de tensões desenvolvidas no reforço pelo movimento diferencial das extremidades da fenda já existente.

As tensões de tracção na superfície do pavimento, que ocorrem nos limites da zona de contacto entre o pneu e o pavimento devido à aplicação de cargas repetidas dos veículos, podem exceder a resistência à tracção das misturas betuminosas, originando fendilhamento com origem na superfície.

O envelhecimento reduz, por fragilização do betume, a capacidade da mistura betuminosa de suportar as tensões e extensões induzidas termicamente e pelo tráfego, principalmente sob acções repetidas, ou seja, o betume envelhecido tem uma aptidão reduzida para se deformar sob a influência de acções externas, em virtude do aumento de rigidez.

Esta redução nas características de deformação do betume diminui, normalmente, a resistência ao fendilhamento das misturas betuminosas. No entanto, o aumento de rigidez das misturas betuminosas originado pelo envelhecimento do betume diminui as extensões de tracção induzidas pelo tráfego, o que pode traduzir-se por uma vida à fadiga mais longa (devido ao menor nível de extensão), apesar da maior fragilidade das misturas betuminosas.

A Figura 3.7 mostra que as misturas betuminosas envelhecidas numa estufa têm uma temperatura de fractura mais alta do que as misturas não envelhecidas, como determinado num ensaio de tensão térmica restringida, no qual um provete com $50 \times 50 \times 250 \text{ mm}^3$ é obrigado a manter um comprimento constante, enquanto a sua temperatura vai sendo reduzida a uma taxa constante até acontecer a fractura devido ao aumento da tensão de tracção provocada termicamente.

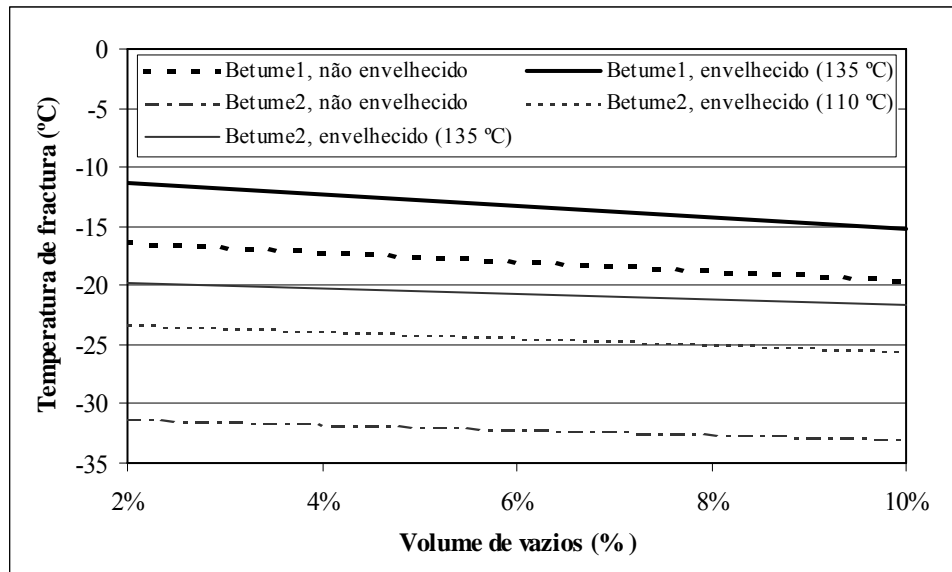


Figura 3.7 – Efeito do envelhecimento na temperatura de fractura do betume (Scholz, 1995)

Em resumo, o envelhecimento do betume fragiliza as misturas betuminosas, o que se traduz, normalmente, num aumento de rigidez, numa menor resistência ao fendilhamento térmico e numa ligação agregado-mastique mais sensível à presença de água, o que diminui a durabilidade das misturas betuminosas.

3.6.2. Presença de Água nas Misturas Betuminosas

Embora muitos factores ambientais contribuam para a degradação das misturas betuminosas, a água parece ser o principal agente de deterioração. Em geral, a água pode reduzir a rigidez ou a resistência duma mistura betuminosa ou causar a perda de ligação entre o mastique e os agregados (perda de adesividade), podendo ambos resultar numa potencial degradação significativa do pavimento.

Os mecanismos de ruína devido à presença água nas misturas betuminosas não são ainda claramente compreendidos. Porém, muitos investigadores (Lottman, 1982_a; Lottman, 1982_b; Tunnicliff and Root, 1984; Terrel and Shute, 1989; Whiteoak, 1990; Curtis et al., 1993; Terrel and Al-Swailmi, 1994) estudaram a sensibilidade à água de betumes e de misturas betuminosas e contribuíram significativamente para uma melhor compreensão dos mecanismos de degradação devido à presença de água.

Genericamente, a água pode degradar as misturas betuminosas de dois modos:

- causando uma redução na força de coesão e na rigidez da mistura betuminosa;
- causando a perda de ligação agregado-mastique, fenómeno também denominado como descolagem.

Lottman (1982_b) sugere uma lista extensiva de mecanismos de degradação das misturas betuminosas na presença de água, que causam a perda de ligação agregado-mastique ou a fragilização das misturas betuminosas, nomeadamente:

- pressão intersticial da água nos vazios de mistura betuminosa, devido ao carregamento repetido transmitido pelos pneus dos veículos;
- diferenças de expansão e contracção térmica, produzidas por ciclos de temperatura acima da temperatura de congelação da água, pela acção do gelo e degelo, pela formação de gelo ou por choque térmico;
- uma combinação da pressão intersticial da água nos vazios de mistura betuminosa com diferenças de expansão e contracção térmica;
- remoção do betume pela água existente na mistura betuminosa, para temperaturas moderadas e altas;
- interacção do vapor de água com o mastique betuminoso e com as interfaces dos agregados de maiores dimensões;
- interacção da água com minerais de argila possivelmente existentes nos agregados finos.

A principal consequência da presença de água nas misturas betuminosas é, indubitavelmente, a perda de ligação agregado-mastique.

Tradicionalmente, considera-se que a perda de ligação agregado-mastique ocorre devido a uma rotura na interface entre o betume e os agregados, com as propriedades da superfície dos agregados a representarem um papel muito importante no comportamento da ligação entre o mastique e os agregados. Porém, Jamieson et al. (1993) observaram que a rotura raramente ocorre na interface entre o betume e os agregados, concluindo que a perda de coesão interna nos agregados ou no mastique é a principal causa de perda de ligação agregado-mastique.

O trabalho de Jamieson et al. (1993) permite compreender o facto da maioria dos ensaios de sensibilidade à água se apoiarem em propriedades mecânicas da mistura betuminosa, antes e após condicionamento, e não em propriedades da interface.

Um estudo realizado por Curtis et al. (1993) demonstrou que a superfície dos agregados ricos em metais alcalino-terrosos²⁶ é menos susceptível à perda de ligação agregado-mastique na presença de água do que a superfície dos agregados ricos em metais alcalinos²⁷. Já se tinha sugerido que a maior susceptibilidade dos agregados siliciosos à perda de ligação agregado-mastique pode ser associada à presença de catiões solúveis em água e de aluminossilicatos, sendo o mecanismo de descolagem, na presença de água, um dos seguintes:

- a dissolução de sais solúveis em água;
- a dissolução de sílica resultante dum ambiente de pH elevado, gerado pela dissolução dos catiões de terra alcalinos;
- a repulsão electrostática entre os agregados, cuja superfície está carregada negativamente, e componentes aniónicos do betume na interface;
- a dissolução de detergentes formados entre os aniões ácidos do betume, na interface, e os catiões de metal alcali na superfície dos agregados.

Os mecanismos que originam a perda de ligação agregado-mastique na presença de água não dependem do tipo genérico de agregado, mas são influenciadas, essencialmente, pela natureza física e química da superfície com que o betume vai entrar em contacto.

Consequências da presença de água nas misturas betuminosas

A degradação devido à presença de água acontece em várias formas e graus de severidade. A consequência primária dos danos devidos à presença de água numa mistura betuminosa é a perda de ligação agregado-mastique.

A perda de ligação agregado-mastique manifesta-se, inicialmente, em áreas localizadas do pavimento, onde o mastique (que se separou dos agregados) migra até à superfície das camadas betuminosas. Esta migração do aglutinante betuminoso resulta numa matriz instável na parte inferior das camadas betuminosas (devido à falta de betume), o que pode conduzir a deformações permanentes na forma de rodeiras ou abatimentos, assim como ao desenvolvimento de desagregações na camada de desgaste (tipo peladas, ninhos ou covas e cabeças de gato) e de fendilhamento sob a acção repetida das cargas dos veículos.

²⁶ Designativo dos metais cálcio, magnésio, estrôncio, bário e rádio, de comportamento químico próximo do dos metais alcalinos.

²⁷ Designativo dos metais que contém alcali (substância capaz de reagir com ácidos de forma análoga à soda cáustica), que constituem o grupo I da classificação periódica (lítio, sódio, potássio, rubídio, célio e frâncio).

A intrusão subsequente de água nestas áreas localizadas danificadas pela água, juntamente com o carregamento repetido do tráfego, acelera a degradação da integridade estrutural da camada de desgaste do pavimento e, possivelmente, das camadas subjacentes. Nesta situação, se estas zonas do pavimento não forem reparadas, pode ocorrer uma significativa degradação localizada da estrutura do pavimento.

Além disso, a presença de água nas misturas betuminosas origina a redução da sua rigidez. Sob a acção do tráfego, um pavimento de rigidez reduzida (devido à presença de água) é mais propenso ao aparecimento de degradações, como resultado do aumento das extensões nas diversas camadas do pavimento, quando se aplica o mesmo nível de tensão.

3.7. Ensaios de Caracterização do Comportamento da Ligação Agregado-Mastique

O comportamento da ligação agregado-mastique das misturas betuminosas é avaliado, normalmente, através de ensaios para determinação da perda de ligação agregado-mastique²⁸ em determinadas condições de serviço (principalmente na presença de água), também denominados de ensaios de sensibilidade à água. Estes ensaios permitem analisar o comportamento das misturas betuminosas em serviço, quando sujeitas a acções climáticas que vão alterar a ligação entre o mastique e os agregados, diminuindo a sua resistência.

O envelhecimento do betume, ao modificar a sua composição, viscosidade e reologia, também influencia o comportamento das misturas betuminosas em serviço. Neste contexto, as características da ligação agregado-mastique modificam-se após envelhecimento, que ocorre naturalmente nas misturas betuminosas aplicadas no pavimento. A formação de moléculas polares durante o envelhecimento melhora a ligação química entre os agregados e o mastique, mas aumenta a sensibilidade à água das misturas betuminosas, o que se traduz numa redução da ligação agregado-mastique na presença de água. Assim, os ensaios de envelhecimento são fundamentais para caracterização da ligação agregado-mastique.

Em resumo, os ensaios fundamentais para caracterização da ligação agregado-mastique são os que permitem avaliar o envelhecimento e a sensibilidade à água das misturas betuminosas.

²⁸ Ao longo deste trabalho, a perda de ligação agregado-mastique também é denominada por perda de adesividade ou descolagem (*Stripping*, na terminologia inglesa).

3.7.1. Ensaios para Simulação do Envelhecimento do Betume

Desde o início do século XX, quando foram apresentados os primeiros trabalhos de investigação sobre o envelhecimento de misturas betuminosas (Dow, 1903), a maioria dos esforços de investigação concentrou-se apenas no envelhecimento do betume e não no envelhecimento das misturas betuminosas. Welborn (1984) e Bell (1989) produziram excelentes compilações dos ensaios utilizados na tentativa de prever o envelhecimento (endurecimento) do betume e das misturas betuminosas.

Welborn (1984) concluiu que, apesar dos ensaios de envelhecimento numa película fina de betume numa estufa (*Thin Film Oven Tests*, na terminologia inglesa) preverem as propriedades do betume durante a fase de construção do pavimento, estes não conseguem reproduzir as alterações nas propriedades do betume durante o tempo de serviço. Contudo, as estufas para envelhecimento acelerado de camadas finas de betume continuam a ser utilizadas em diversos estudos para prever o envelhecimento do betume no pavimento.

Bell (1989) afirmou que, em comparação com os estudos sobre o betume, a investigação sobre o envelhecimento de misturas betuminosas tem sido mais reduzida. No entanto, num trabalho de investigação para o programa SHRP, Bell et al. (1994_a) concluíram que a interacção entre o betume e os agregados tem uma influência significativa no envelhecimento do betume nas misturas betuminosas.

De seguida, serão descritos os principais ensaios de envelhecimento existentes, sendo separados entre os realizados sobre o betume e os realizados sobre as misturas betuminosas. Finalmente, nesta secção, serão apresentados alguns trabalhos de investigação (Kandhal and Koehler, 1984; Kemp and Sherman, 1984; Bell et al., 1994_b) que procuraram relacionar o envelhecimento determinado experimentalmente, em laboratório, com o envelhecimento efectivo *in situ*.

Ensaios de envelhecimento do betume

Diversos investigadores (Lewis and Welborn, 1940; Griffin et al., 1955; Schmidt and Santucci, 1969; Petersen, 1989) efectuaram numerosos trabalhos procurando correlacionar o envelhecimento acelerado do betume, em laboratório, com o envelhecimento do betume *in*

situ. Muitos desses trabalhos de investigação utilizaram técnicas de envelhecimento acelerado de camadas finas de betume, através do seu aquecimento em estufas.

O *Thin Film Oven Test* (TFOT) foi introduzido por Lewis and Welborn, em 1940. Neste ensaio (Figura 3.8), uma amostra de 50 ml de betume é colocada num recipiente plano de 140 mm de diâmetro, de forma a obter uma espessura de 3,2 mm, sendo então aquecida durante 5 horas a 163 °C. Finalmente, a amostra de betume aquecida é ensaiada de modo a determinar a penetração, a ductilidade e o ponto de amolecimento (anel e bola), avaliando-se a alteração destas propriedades em relação ao betume original.

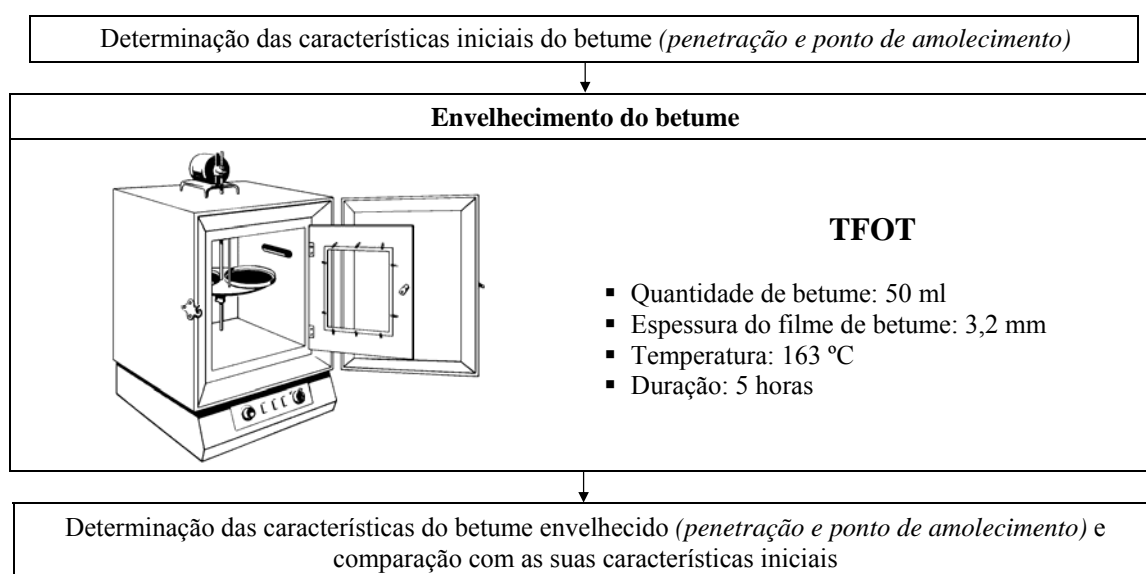


Figura 3.8 – Procedimentos do ensaio de envelhecimento TFOT

O envelhecimento do betume é avaliado com base na viscosidade antes e após ensaio, fornecendo um “índice de envelhecimento”, que pode ser expresso de acordo com a seguinte equação:

$$\text{Índice Envelhecimento} = \frac{P_{\text{Envelhecido}}}{P_{\text{Não Envelhecido}}} \quad (3.4)$$

onde:

$P_{\text{Não Envelhecido}}$ = uma propriedade física determinada no betume não envelhecido (por exemplo, a penetração, a viscosidade ou o ponto de amolecimento);

$P_{\text{Envelhecido}}$ = a mesma propriedade física do mesmo betume, determinada após o betume ter sido envelhecido de algum modo (por exemplo, com o ensaio TFOT).

Apesar do ensaio TFOT ter sido adoptado pelo *American Society for Testing and Materials* (ASTM) em 1969 (ASTM D 1754-94), como método para avaliar o envelhecimento do betume durante a fase de produção na central betuminosa, as modificações a este ensaio foram numerosas e significativas desde que foi implementado.

Inicialmente, introduziram-se pequenas alterações, relacionadas com a espessura do filme de betume, com o tempo de exposição ao calor e com a temperatura de ensaio. No entanto, a principal modificação ao TFOT envolveu a colocação do betume num recipiente de vidro e a rotação do mesmo, de forma a ser possível o envelhecimento de camadas de betume com espessuras inferiores aos 3,2 mm usados inicialmente no TFOT.

O *Rolling Thin Film Oven Test* (RTFOT), desenvolvido em 1963 pela *California Division of Highways*, envolve a rotação de recipientes de vidro que contêm amostras de 35 gramas de betume, numa estufa a 163 °C, durante 75 minutos (Figura 3.9). Nestas condições são obtidas camadas de betume com uma espessura de 1,25 mm.

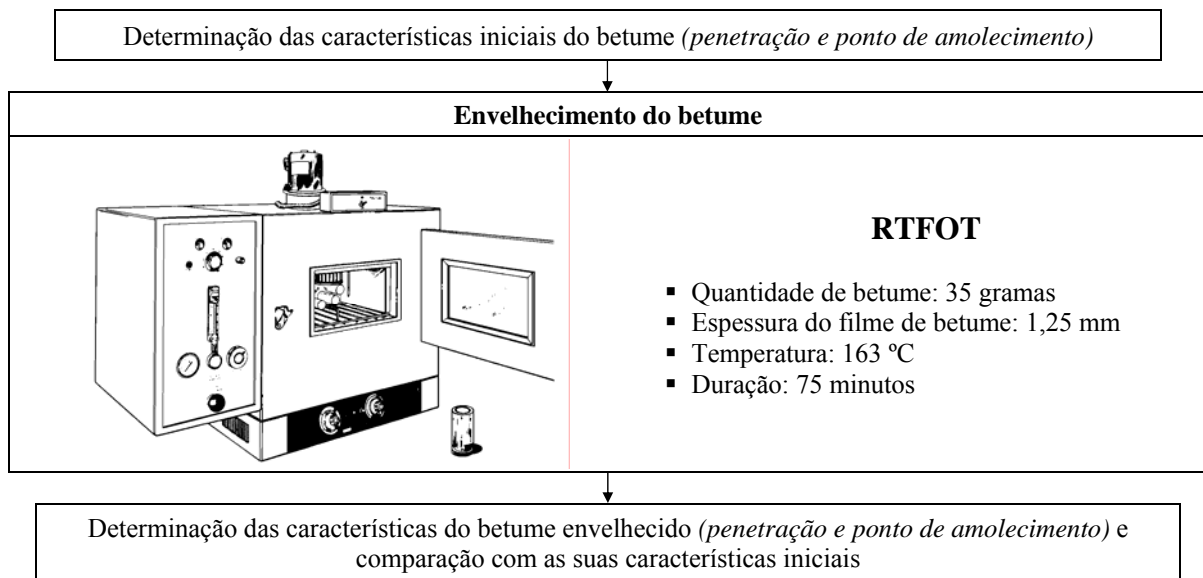


Figura 3.9 – Procedimentos do ensaio de envelhecimento RTFOT

Desde 1963, fizeram-se várias alterações ao RTFOT, na sua maioria pouco significativas. Schmidt and Santucci (1969) conseguiram envelhecer camadas de betume muito mais finas (com uma microespessura) no *Rolling Microfilm Oven Test* (RMFOT), dissolvendo o betume em benzeno, cobrindo os recipientes de vidro com esta solução e permitindo assim que o benzeno se evapore. O betume é então aquecido a 99 °C durante 24 horas. A principal desvantagem deste ensaio é que apenas são obtidos 0,5 gramas de betume de cada recipiente.

O *Thin Film Accelerated Ageing Test* (TFAAT), desenvolvido por Petersen em 1989, consiste numa modificação do RMFOT de modo a obter amostras de betume envelhecido em quantidade suficiente para permitir a realização de posteriores ensaios de determinação das suas propriedades físicas. No entanto, Bell (1989) refere que os mecanismos de oxidação do TFAFF são muito diferentes dos que ocorrem num pavimento.

Diversos investigadores (Lee, 1973; Edler et al., 1985) indicaram que, apesar dos ensaios para envelhecimento acelerado de camadas finas de betume numa estufa caracterizarem adequadamente o endurecimento do betume durante o processo de produção em central, estes ensaios falham na previsão adequada do endurecimento a longo prazo *in situ*. Assim, combinaram este tipo de ensaios com ensaios de envelhecimento oxidativo.

Lee (1973) desenvolveu o ensaio de envelhecimento *Iowa Durability Test* (IDT), no qual submeteu o betume original ao TFOT e, em seguida, a um tratamento de pressão oxidativa. Neste tratamento, o betume envelhecido no TFOT é colocado num recipiente que é pressurizado a 2,07 MPa, usando oxigénio puro, e é aquecido a 65 °C durante 1000 horas. O autor observou que o envelhecimento do betume em laboratório segue uma relação hiperbólica semelhante à encontrada *in situ* durante um período de 5 anos de envelhecimento.

Edler et al. (1985) realizaram um estudo, na África do Sul, para determinar a forma de retardar o envelhecimento oxidativo das misturas betuminosas. Nesse trabalho, o betume foi submetido ao RTFOT (8 horas), seguindo-se uma oxidação a uma pressão de 2,07 MPa e a uma temperatura de 65 °C durante 96 horas. Este procedimento resultou em índices de envelhecimento idênticos aos que ocorrem no pavimento ao fim de 11 a 13 anos de serviço. Além disso, observou-se que, apesar da adição de cal ter aumentado a viscosidade do betume antes do envelhecimento, também reduziu significativamente o seu envelhecimento.

Em 1991 desenvolveu-se um equipamento de ensaio para envelhecimento acelerado de betumes no centro de investigação rodoviária belga (CRR), similar em conceito ao RTFOT. Este equipamento consiste num grande cilindro com uma abertura central numa das extremidades pela qual o betume é introduzido e extraído. Depois de encher o cilindro com 500 gramas de betume, este é colocado em rotação, ao mesmo tempo em que, por hora, se introduzem 4 a 5 litros de oxigénio no cilindro. A rotação dum rolo dentro do cilindro distribui o betume numa camada uniforme com 2 mm de espessura.

Choquet (1993) demonstrou que um ensaio realizado neste equipamento, a uma temperatura de 85 °C, durante 6 dias, reflecte o envelhecimento *in situ* em diversos pavimentos.

Nos Estados Unidos, uma equipa de trabalho do SHRP A-002A (Anderson et al., 1994) desenvolveu um método para simular em laboratório o envelhecimento oxidativo a que o betume é submetido *in situ*. O método referido como TFO-PAV envolve uma oxidação inicial com o RTFOT ou o TFOT para simular o envelhecimento que ocorre durante a produção na central betuminosa, ao qual se segue uma oxidação do betume proveniente de um dos primeiros ensaios, num recipiente pressurizado para envelhecimento (PAV), de modo a simular o envelhecimento que ocorre após espalhamento da mistura betuminosa no pavimento, conforme se pode observar na Figura 3.10.

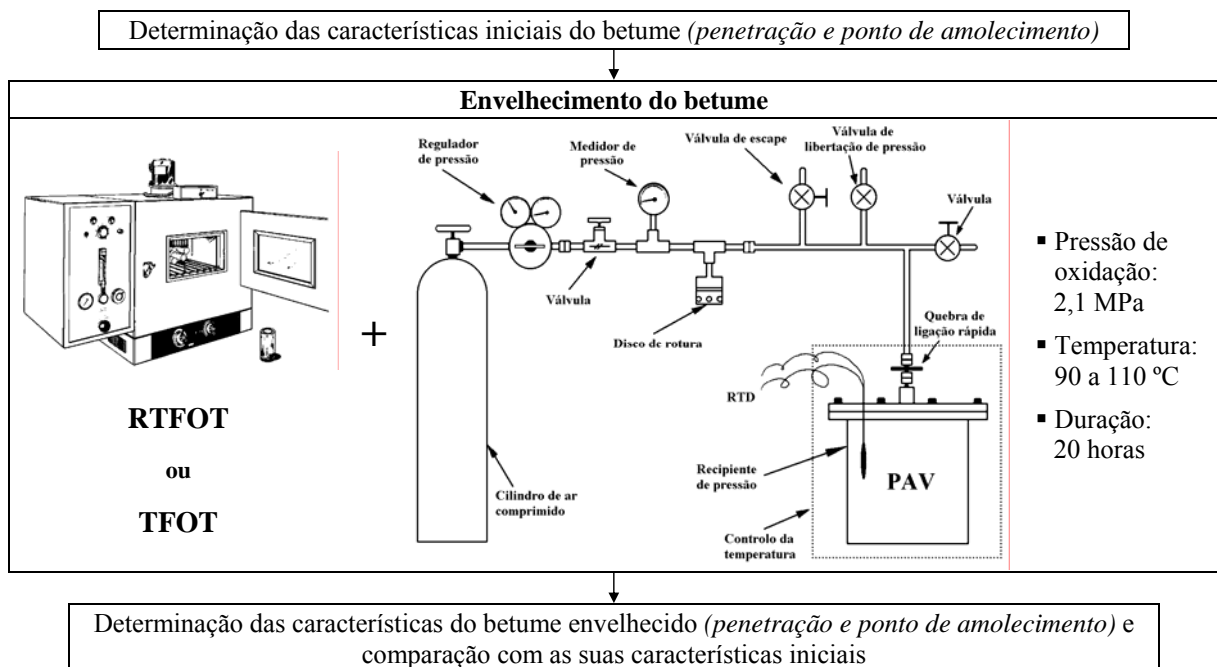


Figura 3.10 – Procedimentos do ensaio de envelhecimento TFO-PAV

Se o resíduo dum dos primeiros ensaios (preferencialmente o RTFOT) for condicionado no PAV durante 20 horas a uma pressão de 2,1 MPa e a uma temperatura entre 90 e 110 °C, consegue simular o envelhecimento que ocorre no pavimento ao fim de 12 anos de serviço.

Ensaio de envelhecimento das misturas betuminosas

A realização de ensaios de envelhecimento de misturas betuminosas não é uma proposta recente. Uma das primeiras propostas de ensaio surgiu no início do século XX (Dow, 1903),

na qual, os betumes recuperados a partir de misturas betuminosas envelhecidas e não envelhecidas, eram ensaiados para determinar as alterações de penetração originadas pelo envelhecimento do betume. O envelhecimento da mistura betuminosa foi realizado através dum aquecimento a 149 °C, durante 30 minutos, antes da recuperação do betume.

O desenvolvimento de um método normalizado para recuperação de betumes a partir das misturas betuminosas justificou a realização de vários estudos subsequentes. Neste contexto, Bell (1989) identificou quatro categorias de ensaios de envelhecimento de misturas betuminosas, nomeadamente:

- procedimentos de aquecimento com determinada duração;
- ensaios de oxidação;
- tratamentos com raios infravermelhos ou ultravioletas;
- endurecimento por estruturação molecular.

Procedimentos de aquecimento com determinada duração

Pauls and Welborn (1952) desenvolveram o primeiro ensaio deste tipo, no qual cilindros com misturas de betume e areia foram expostos à temperatura de 163 °C por diversos períodos. Para cada um dos cilindros, determinou-se a resistência à compressão, assim como a consistência do betume recuperado, que foi comparada com a consistência inicial do betume. As principais conclusões deste estudo foram as seguintes:

- as propriedades de envelhecimento dos betumes podem ser avaliadas, no laboratório, pela alteração da resistência à compressão dos provetes envelhecidos na estufa, ou através de ensaios de penetração sobre o betume recuperado dos provetes envelhecidos, ou ainda utilizando o procedimento do TFOT;
- como o procedimento do TFOT é relativamente simples, tem uma importância acrescida para previsão do envelhecimento do betume a altas temperaturas.

Num estudo de Plancher et al. (1976), para avaliação do efeito da cal no envelhecimento do betume, foi utilizado um procedimento de aquecimento para envelhecimento de provetes preparados com mistura betuminosa. Os autores observaram que, em relação às misturas betuminosas convencionais, a resistência à tracção indirecta das misturas betuminosas tratadas com cal foi menos alterada após o processo de envelhecimento, concluindo-se que a cal tem um efeito considerável no retardamento do envelhecimento das misturas betuminosas.

Hugo and Kennedy (1985) desenvolveram um método para envelhecimento de provetes de mistura betuminosa numa estufa, à temperatura de 100 °C. Este procedimento foi realizado durante 4 e 7 dias, numa atmosfera seca e numa atmosfera com 80% de humidade relativa. Após envelhecimento, o betume foi recuperado para determinação da viscosidade. Alguns provetes, obtidos a partir de lajes, foram pesados antes e após envelhecimento, sendo a perda de peso um indicador da perda de voláteis. Finalmente, foram cortadas vigas das mesmas lajes e determinou-se a redução do seu comprimento durante o processo de envelhecimento, o que também é um indicador da perda de voláteis.

Von Quintus et al. (1991) publicaram as conclusões da segunda fase dum estudo para desenvolver um sistema de análise de misturas betuminosas. Os autores investigaram o aquecimento de misturas betuminosas numa estufa, para simular o “endurecimento durante a produção das misturas betuminosas”, ou seja, o envelhecimento a curto prazo. O método de laboratório envolveu o aquecimento de misturas betuminosas soltas²⁹, durante períodos de 8, 16, 24 e 36 horas numa estufa a uma temperatura de 135 °C (Figura 3.11).

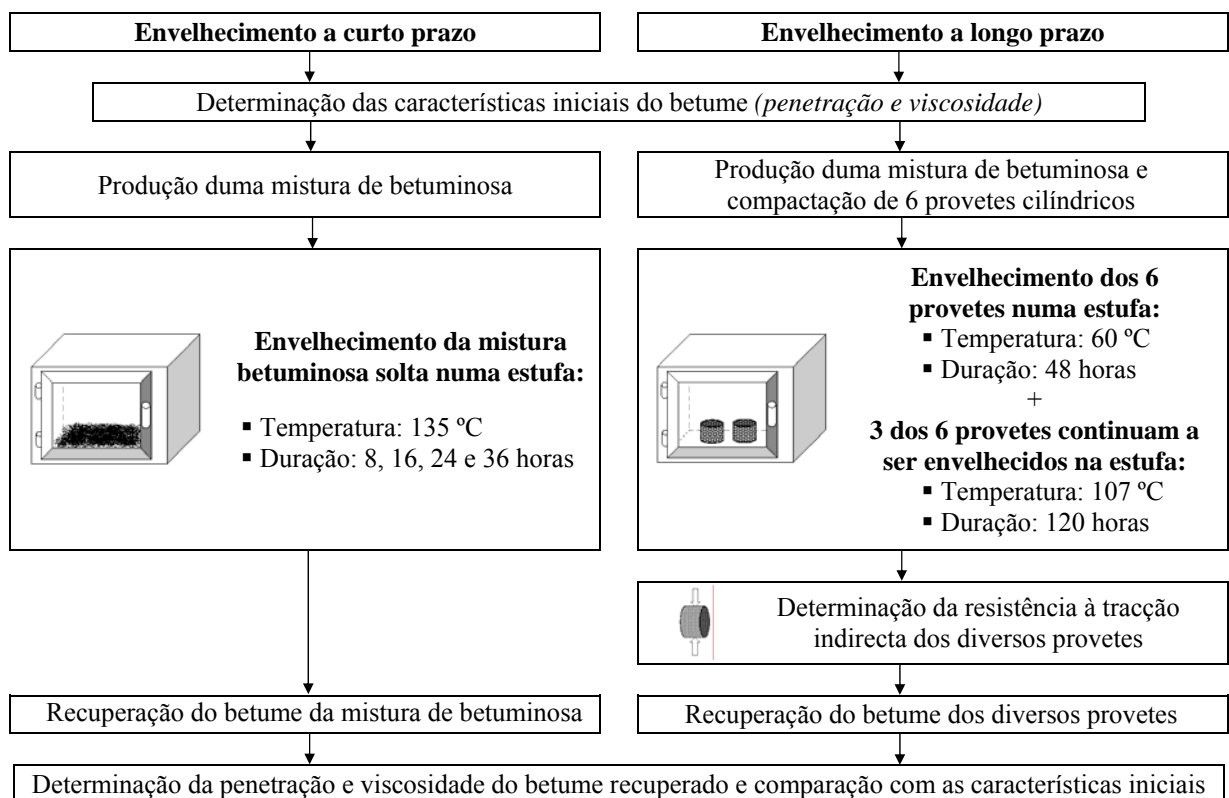


Figura 3.11 – Procedimentos dos ensaios de envelhecimento desenvolvidos por Von Quintus et al. (1991) para o sistema de análise de misturas betuminosas

²⁹ Uma mistura betuminosa solta é uma mistura que já foi produzida mas ainda não foi compactada.

Von Quintus et al. (1991) compararam as relações entre a penetração e a viscosidade recuperada e inicial, para betumes usados em cinco projectos, quer para o envelhecimento *in situ* quer para o envelhecimento em laboratório, obtendo boas relações em dois projectos.

Os mesmos autores também investigaram o “envelhecimento a longo prazo”, utilizando um dos processos de envelhecimento descritos em seguida.

- Envelhecimento forçado e acelerado numa estufa, no qual seis provetes compactados são colocados numa estufa a 60 °C, durante 48 horas. Depois de se retirar três provetes da estufa, aumenta-se a temperatura para 107 °C, de modo a envelhecer os restantes três provetes durante 120 horas (Figura 3.11).
- Envelhecimento com pressão de oxidação, submetendo três provetes compactados a um condicionamento à temperatura de 60 °C e à pressão de 0,7 MPa, durante 120 a 240 horas.

Von Quintus et al. (1991) concluíram que a resistência à tracção indirecta era mais alta para as misturas betuminosas envelhecidas na estufa, e a extensão de rotura era mais baixa para as misturas condicionadas com pressão de oxidação, o que implica que o envelhecimento na estufa é mais severo. Depois de compararem o envelhecimento *in situ* com o envelhecimento em laboratório, para ambos os métodos atrás descritos, os autores recomendaram que fosse usado, preferencialmente, o “envelhecimento a longo prazo” na estufa, por simular melhor o envelhecimento que acontece no pavimento depois de 10 anos de serviço (Figura 3.11).

Durante o programa SHRP, Bell et al. (1994_a) desenvolveram métodos para envelhecer misturas betuminosas densas de modo a simular o envelhecimento a curto prazo, que ocorre durante a construção do pavimento, e o envelhecimento a longo prazo, que ocorre durante o período de vida do pavimento. O método de envelhecimento a curto prazo numa estufa (STOA – *Short-Term Oven Aging*) envolve o aquecimento numa estufa, durante 4 horas a uma temperatura de 135 °C, de uma mistura betuminosa num estado solto (Figura 3.12). Foram desenvolvidas duas alternativas para simular o envelhecimento a longo prazo de misturas de betuminosas:

- envelhecimento a longo prazo numa estufa (LTOA – *Long-Term Oven Aging*), através do aquecimento forçado e acelerado de misturas betuminosas numa estufa;
- oxidação a uma baixa pressão (LPO – *Low-pressure oxidation*), fazendo passar oxigénio aquecido através de provetes colocados numa célula triaxial modificada.

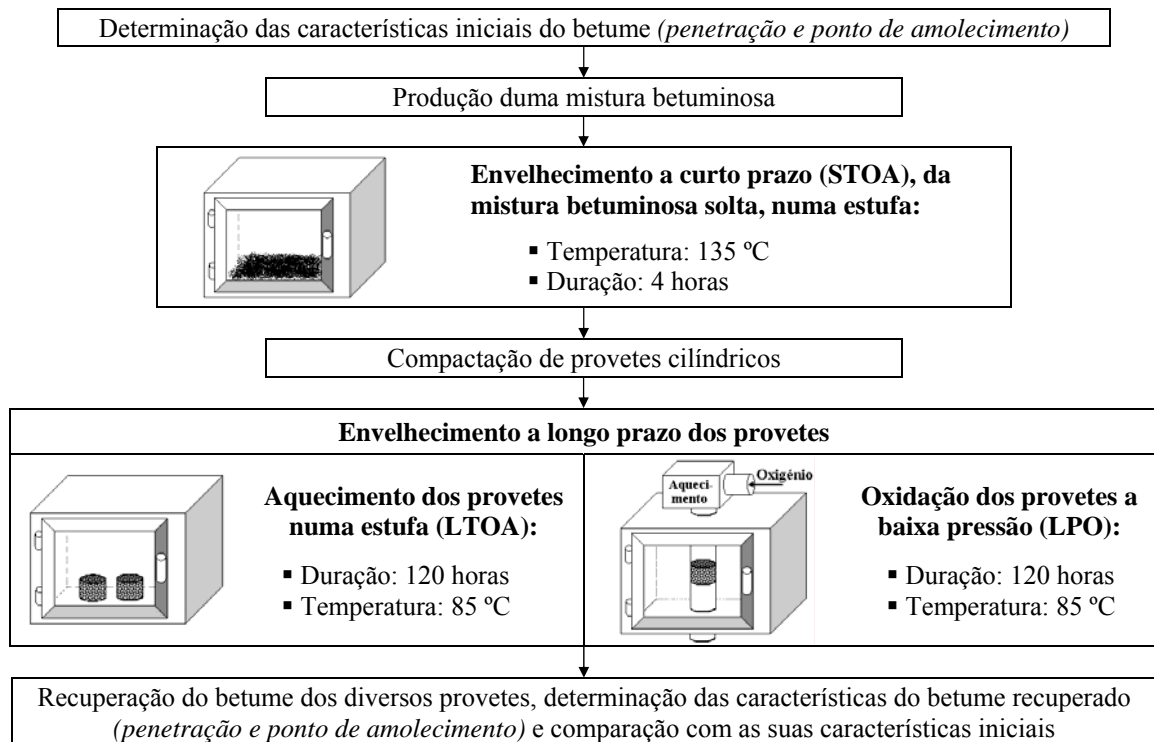


Figura 3.12 – Ensaios de envelhecimento de misturas betuminosas a curto (STOA) e a longo prazo (LTOA ou LPO), desenvolvidos por Bell et al. (1994_a)

Ambos os métodos de envelhecimento a longo prazo foram aplicados sobre provetes compactados, preparados com misturas previamente submetidas a um envelhecimento a curto prazo. Bell and Sosnovske (1994) avaliaram várias combinações de tempo de exposição e temperatura para o envelhecimento a longo prazo, nomeadamente, LTOA a 85 °C durante 5 dias, LTOA a 100 °C durante 2 dias e LPO a 60 °C ou 85 °C durante 5 dias.

Com base nas conclusões do seu trabalho, os mesmos autores recomendaram que as misturas betuminosas soltas deveriam ser envelhecidas a curto prazo a uma temperatura de 135 °C durante 4 horas, seguindo-se a aplicação de um dos métodos de envelhecimento a longo prazo (LTOA ou LPO), durante 120 horas a uma temperatura de 85 °C, em misturas compactadas.

Bell et al. (1994_b) descrevem a validação dos procedimentos de envelhecimento a curto e a longo prazo. Uma avaliação preliminar do procedimento de envelhecimento a curto prazo (STOA) indicou que os módulos de rigidez dos provetes preparados em laboratório corresponderam aos módulos de rigidez dos “provetes de campo” sem elementos aditivos. A utilização conjunta dos procedimentos de envelhecimento a curto e a longo prazo consegue simular o envelhecimento que acontece *in situ* após 10 a 15 anos de serviço.

Ensaio de oxidação

Um estudo de Kumar and Goetz (1977) avaliou os efeitos da espessura da camada de betume, dos vazios e da permeabilidade das misturas de betuminosas no endurecimento do betume. O método utilizado para envelhecer as misturas betuminosas consistiu em “impelir” oxigénio aquecido através dum conjunto de provetes compactados, a uma velocidade de escoamento reduzida, para evitar turbulência no fluxo de ar através do provete. Os provetes foram mantidos a uma temperatura de 60 °C durante dez dias, sendo ensaiados ao fim de 1, 2, 4, 6 e 10 dias num ensaio de fluência simples. Estes autores concluíram que, para misturas betuminosas abertas, a relação entre a espessura da camada de betume e a permeabilidade das respectivas misturas, era o melhor factor para previsão da resistência ao envelhecimento. Para as misturas betuminosas densas, a permeabilidade era o melhor indicador.

Kim et al. (1986) desenvolveram um ensaio de oxidação para envelhecer provetes preparados em laboratório. Os provetes foram envelhecidos em oxigénio a uma pressão de 0,7 MPa e a uma temperatura de 60 °C durante 1, 2, 3 e 5 dias. Os efeitos do envelhecimento foram avaliados através do módulo de rigidez e da resistência à fadiga das misturas betuminosas, utilizando o ensaio de tracção indirecta. Neste trabalho, observou-se que a relação entre a rigidez da mistura betuminosa envelhecida e não envelhecida aumenta, geralmente, com o tempo de envelhecimento, e mais rapidamente para misturas mal compactadas.

Os resultados obtidos para a resistência à fadiga no ensaio de tracção indirecta (executado em tensão controlada) demonstraram que o aumento do tempo de envelhecimento resultou num aumento do número de ciclos até à rotura, o que se traduz numa vida à fadiga mais longa, principalmente para as misturas betuminosas mais permeáveis.

Teoricamente, a tendência seria diferente se os ensaios fossem executados com um nível fixo de extensão, porque o envelhecimento torna as misturas mais rígidas (aumentando o nível de tensão em cada ciclo de carga) e frágeis, o que deve originar uma menor resistência à fadiga. Porém, esta teoria foi avaliada no presente trabalho, tendo-se chegado a conclusões semelhantes às que Kim et al. (1986) obtiveram com ensaios de tensão controlada. Aparentemente, pode ocorrer um aumento da resistência à fadiga após envelhecimento em laboratório devido a uma melhoria da ligação entre os diversos componentes da mistura betuminosa, provocada pelo aumento do tempo de reacção química a temperaturas elevadas.

Potschka (1985) desenvolveu um equipamento de ensaio que pode ser utilizado para envelhecer misturas betuminosas não compactadas, permitindo assim a investigação do envelhecimento do betume quando este está ligado aos agregados. O equipamento consiste num recipiente isolado que é electricamente aquecido e termostaticamente controlado, no qual se coloca a mistura betuminosa não compactada. Um “ar” sintético (constituído por 20,5% oxigénio e 79,5% nitrogénio) passa através duma câmara de pré-aquecimento que seca o “ar”. O “ar” sintético seco atravessa o recipiente que contém a mistura betuminosa solta e sai por uma abertura existente na tampa superior do recipiente.

O “ar” sintético pode ser recuperado e posteriormente analisado em relação à existência de produtos de reacção e de destilação. O autor observou que o uso de “ar” sintético com nitrogénio puro permite investigar as influências separadas da oxidação e da destilação (por exemplo, polimerização e volatilização). A selecção dos parâmetros de ensaio, como o fluxo de ar, a temperatura e o tempo de ensaio, permite simular várias situações práticas em que ocorre o envelhecimento do betume, por exemplo, condições de armazenamento nos silos, condições existentes *in situ* e outras.

Tratamentos com raios infravermelhos ou ultravioletas

Entre os vários ensaios para betumes a usar em pavimentação, encontra-se um ensaio de envelhecimento por radiação infravermelha, desenvolvido por Hveem et al. (1963), no qual uma mistura de areia e betume (5 a 7 μm de espessura do filme de betume) é ensaiada num estado de “semi-compactação”. A radiação infravermelha é controlada para garantir uma temperatura de 60 °C, enquanto se mantém um fluxo constante de ar a 41 °C a atravessar o provete. A utilidade deste ensaio é reduzida, porque são necessárias 1000 horas de exposição à radiação infravermelha para obter um valor equivalente a 5 anos de envelhecimento *in situ*.

Também Tia et al. (1988) realizaram um estudo que incluiu o desenvolvimento de métodos de envelhecimento que usam calor e luz ultravioleta (UV). Estes investigadores observaram que se obtinham níveis de envelhecimento semelhantes em amostras de mistura betuminosa envelhecidas na estufa ou envelhecidas com a luz UV. Assim, recomendaram que fosse desenvolvido um ensaio que incorporasse ambos os métodos de envelhecimento, utilizando uma temperatura operacional de 60 °C. Nesse estudo, os autores concluíram que a luz UV era a principal fonte de envelhecimento das misturas betuminosas à superfície.

Endurecimento por estruturação molecular

Neste grupo enquadra-se um ensaio de avaliação da coesão interna das misturas betuminosas, desenvolvido por Hveem et al. (1963), que envolve a preparação de quatro provetes de formato longo e esbelto, efectuados com uma mistura de betume e areia. Dois provetes são ensaiados num equipamento para avaliação da coesão, no qual os provetes são extrudidos de um suporte, de tal forma que agem como consolas que se partem em pequenas secções. Os restantes provetes são ensaiados da mesma forma, depois de submetidos a um envelhecimento a 60 °C, durante 24 horas. Se o “comprimento de fractura” dos dois conjuntos de provetes, que se define como o comprimento médio das secções quebradas, for diferente, então há uma tendência para o betume envelhecer devido a estruturação molecular.

No Quadro 3.5, apresenta-se uma síntese dos diversos métodos de ensaio existentes para simulação laboratorial do envelhecimento do betume, assim como os procedimentos utilizados em cada método de ensaio.

Quadro 3.5 – Ensaio de simulação do envelhecimento do betume

Método de envelhecimento		Procedimentos utilizados no método de envelhecimento			
		Aquecimento com determinada duração	Oxidação a determinada pressão	Tratamentos com raios infravermelhos ou ultravioletas	Endurecimento por estruturação molecular
Ensaio efectuado numa amostra de betume	TFOT (1940)	X			
	RTFOT (1963)	X			
	RMFOT (1969)	X			
	TFAAT (1989)	X			
	IDT (1973)	X	X		
	Edler et al. (1985)	X	X		
	CRR (1991)		X		
	TFO-PAV (1994)	X	X		
Ensaio efectuado numa amostra ou provete de mistura betuminosa	Pauls and Welborn (1952)	X			
	Plancher et al. (1976)	X			
	Hugo and Kennedy (1985)	X			
	Von Quintus et al. (1991)	X	X		
	Bell et al. (1994)	X	X		
	Kumar and Goetz (1977)		X		
	Kim et al. (1986)		X		
	Potschka (1985)		X		
	Hveem et al. (1963)	X		X	X
	Tia et al. (1988)	X		X	

Correlação entre os ensaios de envelhecimento laboratoriais e o desempenho *in situ*

Zube and Skog (1969) realizaram inspeções periódicas e sondagens de trechos experimentais durante um período de vários anos, para investigar, entre outros factores, a mudança nas propriedades dos vários betumes em relação às propriedades iniciais, durante a fase de produção em central e ao longo do período de vida do pavimento. No final desta investigação, os autores chegaram às seguintes conclusões:

- betumes com diferentes origens, embora submetidos a condições idênticas, demonstraram diferentes graus de envelhecimento durante a produção em central;
- a porosidade inicial e a sua variação durante o período de vida do pavimento, juntamente com o teor em betume, parecem ser os factores com maior influência no envelhecimento obtido para os vários betumes;
- os resultados do TFOT demonstraram ter uma correlação excelente com o envelhecimento do betume na fase de produção em central.

Vallerga and Halstead (1971) realizaram um estudo sobre betumes utilizados em pavimentos com 11 a 13 anos de serviço, e observaram que o factor mais influente no envelhecimento do ligante betuminoso num pavimento é a porosidade das misturas betuminosas. Em pavimentos cuja porosidade das misturas betuminosas é inferior a 2%, o envelhecimento *in situ* durante 11 a 13 anos de serviço demonstrou ser desprezível. Acima deste valor, o envelhecimento aumentou em função da porosidade das misturas betuminosas.

Kemp and Sherman (1984) apresentaram um estudo sobre o envelhecimento *in situ* durante 1, 2 e 4 anos, em diferentes climas. Nesse estudo determinaram a correlação entre as propriedades do betume, o grau de compactação (porosidade da mistura betuminosa) e a porosidade dos agregados, em várias condições climáticas. As principais conclusões desse estudo foram as seguintes:

- a temperatura média do ar foi o factor que mais afectou o índice de envelhecimento do betume, com as temperaturas elevadas a originarem um maior envelhecimento;
- a porosidade da mistura betuminosa também contribuiu para a taxa de oxidação, com a porosidade mais elevada a ser a mais prejudicial;
- nas regiões climáticas quentes, a porosidade dos agregados demonstrou ter um efeito significativo no envelhecimento do betume, principalmente nos betumes mais susceptíveis à volatilização.

Os mesmos autores identificaram condições a seguir enunciadas como sendo aquelas que retardam o envelhecimento do betume e, assim, aumentam a durabilidade das misturas betuminosas:

- conformidade com as especificações de compactação, de modo a evitar a execução de pavimentos em que a porosidade das misturas betuminosas seja elevada;
- uso selectivo de betumes, adequados à qualidade dos agregados disponíveis;
- utilização de agregados que não sejam porosos, se possível, em climas quentes;
- uso de betumes mais moles (penetração mais elevada), mas consistentes com as imposições de cura e de estabilidade das misturas betuminosas;
- isolamento do pavimento com um revestimento superficial, em ambientes quentes.

Kandhal and Koehler (1984), no âmbito de três projectos realizados pelo *Pennsylvania Department of Transportation*, para investigação do envelhecimento do betume em pavimentos realizados com misturas betuminosas densas, verificaram os seguintes factos:

- as mudanças na porosidade das misturas betuminosas e nas propriedades do betume ao longo do tempo demonstraram seguir um modelo hiperbólico;
- a ductilidade do betume a baixas temperaturas mostrou ser um factor influente no comportamento dos pavimentos, estando os betumes menos dúcteis associados a uma incidência mais alta de fendilhamento longitudinal devido às cargas do tráfego;
- o desempenho do pavimento foi muito influenciado pela porosidade, embora o índice de envelhecimento do betume utilizado nas misturas betuminosas que, após submetidas a uma pós-compactação, tinham uma porosidade inferior a 3%, tenha sido muito reduzido.

Bell (1989) observou que várias investigações sobre envelhecimento chegaram a conclusões semelhantes, que são resumidas em seguida.

- Betumes de diferentes origens apresentam diferentes índices de envelhecimento, mesmo que todos os outros factores sejam iguais ou semelhantes.
- A porosidade da mistura betuminosa compactada é um dos principais factores que afectam o índice de envelhecimento do betume, quando em serviço no pavimento. Além disso, o envelhecimento das misturas betuminosas com uma porosidade muito baixa parece ser desprezível.
- As alterações nas propriedades físicas do betume em função do tempo seguem uma relação hiperbólica, que se relaciona com a diminuição da porosidade das misturas betuminosas ao longo do tempo, resultante da pós-compactação.

- Embora existam, por vezes, boas correlações entre o envelhecimento previsto nos ensaios de laboratório (tipicamente, TFOT) e o envelhecimento *in situ*, essas correlações estão geralmente limitadas a condições e materiais específicos. Nenhum ensaio mostrou uma boa correlação com o comportamento *in situ* para uma grande variedade de materiais e condições.

3.7.2. Ensaios para Simulação da Sensibilidade à Água das Misturas Betuminosas

Entre os numerosos ensaios desenvolvidos para determinar se uma mistura betuminosa é propensa a deteriorar-se devido à presença de água, Terrel and Shute (1989) identificaram os seguintes, como sendo os mais utilizados:

- ensaio de resistência à tracção indirecta (ou ensaio de rigidez com tracção indirecta) com o condicionamento de Lottman (Lottman, 1982_a);
- ensaio AASHTO T283, habitualmente denominado como ensaio de Lottman modificado;
- ensaio de resistência à tracção indirecta com o condicionamento de Tunnicliff and Root (1984);
- *boiling water tests* (ensaio em água a ferver);
- ensaios de imersão-compressão (ASTM D1075; 37);
- ensaio de gelo-degelo em pedestal;
- ensaio de imersão estática (ASTM D1664; 37);
- ensaio de Marshall com condicionamento.

Terrel and Shute (1989) dividiram estes ensaios nas categorias genéricas a seguir indicadas.

- Ensaio realizados em agregados envolvidos por betume, que são imersos em água mantida à temperatura ambiente ou a ferver. A quantificação da separação entre o betume e os agregados é então realizada através de inspecção visual.
- Ensaio realizados em misturas betuminosas compactadas, produzidas em laboratório ou obtidas a partir de pavimentos existentes. A quantificação dos danos originados pela presença de água é geralmente feita pela relação entre a resistência ou a rigidez dos provetes condicionados³⁰ e não condicionados³¹.

³⁰ “Condicionado” refere-se às propriedades da mistura betuminosa compactada, depois de submetida a algum tipo de tratamento (por exemplo, imersão em água) que simula as condições de serviço existentes no pavimento.

³¹ “Não condicionado” refere-se às propriedades duma mistura betuminosa compactada que não foi submetida a nenhum tipo de tratamento após a sua carotagem no pavimento ou após a sua produção no laboratório.

Terrel and Al-Swailmi (1994) observaram que nenhum dos ensaios atrás identificados sobressaiu como aceitável para uma grande diversidade de condições e materiais, e então descreveram um novo ensaio, desenvolvido durante o programa SHRP A-003A, para avaliar a sensibilidade das misturas betuminosas à degradação induzida pela água. Adicionalmente, no programa SHRP A-003B, Curtis et al. (1993) descrevem um método desenvolvido para ser usado como ensaio de verificação, para determinar se ocorrem degradações numa mistura betuminosa, devido à presença de água.

Whiteoak (1990) identificou seis categorias de ensaios para determinação da perda de ligação agregado-mastique das misturas betuminosas em serviço, especialmente na presença de água:

- ensaios de imersão estática;
- ensaios de imersão dinâmica;
- ensaios de imersão química;
- ensaios mecânicos com imersão;
- ensaios *Wheel-Tracking* com imersão;
- ensaios de envolvimento dos agregados pelo betume (*Coating Tests*).

De acordo com as duas categorias genéricas propostas por Terrel and Shute (1989), a seguir serão descritos os ensaios actualmente utilizados para determinação da sensibilidade das misturas betuminosas à presença de água. Finalmente, nesta secção, apresentam-se as principais conclusões dos trabalhos de Lottman (1982_a e 1982_b) e Allen and Terrel (1994), sobre a correlação dos resultados experimentais obtidos nos ensaios de sensibilidade à água, com o respectivo comportamento das misturas betuminosas *in situ*.

Ensaio sobre misturas betuminosas não compactadas

Para avaliar a quantidade de betume que se separa dos agregados, como resultado da submersão numa mistura betuminosa não compactada em água, desenvolveram-se vários métodos de ensaio, que incluem o *Boiling Water Test* (ensaio em água a ferver), o ensaio de imersão estática, ensaios de imersão dinâmica e ensaios de imersão química.

O *Boiling Water Test* envolve a colocação numa amostra de 200 a 300 gramas de mistura betuminosa em água a ferver durante 1 a 10 minutos. Depois de estar submersa em água a ferver durante o tempo pré-definido, seca-se a mistura betuminosa e avalia-se a quantidade de

betume que continua ligada aos agregados, através duma inspecção visual da percentagem da área superficial dos agregados que continua coberta por betume. Terrel and Shute (1989) observaram que uma limitação do *Boiling Water Test* é o facto deste ensaio apenas reflectir a perda de adesão e não a perda de coesão, que teria de ser obtida através dum ensaio mecânico.

O ensaio de imersão estática (ASTM D1664; 37) consiste em cobrir 100 gramas de agregados com determinada quantidade de ligante betuminoso (5,5 gramas de betume) e em submergir esta mistura em 400 ml de água destilada com um pH de 6 a 7 durante 16 a 18 horas. No final do ensaio determina-se, visualmente, se a área superficial dos agregados cobertos com betume é superior ou inferior a 95% da sua área superficial total (Figura 3.13).

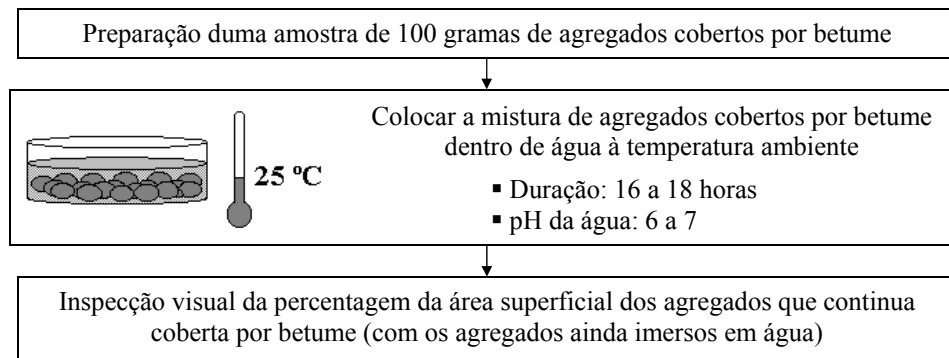


Figura 3.13 – Procedimentos do ensaio de imersão estática (ASTM D1664; 37)

Whiteoak (1990) indica que os ensaios de imersão dinâmica são semelhantes aos ensaios de imersão estática, excluindo o facto da mistura betuminosa submersa em água ser mecanicamente agitada através de amassadura ou vibração.

Whiteoak (1990) também descreve os ensaios de imersão química, nos quais os agregados envolvidos com betume são aquecidos em soluções que contêm diferentes concentrações de carbonato de sódio. A concentração da solução de carbonato de sódio para a qual se observa uma descolagem mais rápida do betume a partir dos agregados é utilizada como medida para avaliação da ligação entre o betume e os agregados.

Curtis et al. (1993) desenvolveram o ensaio de adsorção pura (*Net Adsorption Test*), no âmbito do programa SHRP, para ser usado como procedimento de verificação, de modo a seleccionar betumes e agregados que tenham uma boa ligação entre eles, e para determinar a eficácia dos aditivos “anti-descolagem”.

O ensaio envolve a adsorção de betume dissolvido em tolueno pelos agregados, seguindo-se uma fase de descolagem do betume em meio aquoso. A fase de adsorção tem uma duração de 6 horas e consiste em misturar uma solução de tolueno-betume com agregados. A adsorção é medida indirectamente, pela diminuição da concentração em betume na solução de tolueno-betume. Depois da fase de adsorção, uma certa quantidade de água é introduzida no sistema anterior, descolando parte do betume que já se encontrava ligado aos agregados, o que origina um aumento da concentração em betume na solução tolueno-betume. No final, denomina-se de adsorção pura a quantidade de betume que permanece ligado aos agregados.

Ensaio sobre misturas betuminosas compactadas

O ensaio de gelo-degelo em pedestal (FTPT – *Freeze-Thaw Pedestal Test*), desenvolvido no *Texas Department of Transportation*, simula as mudanças de viscosidade em misturas betuminosas que estiveram em serviço durante cinco anos. Neste ensaio, preparam-se provetes com 41 mm de diâmetro e 19 mm de altura, usando agregados de dimensão constante (entre 0,50 e 0,85 mm). Em seguida, os provetes são mantidos a 23 °C durante 3 dias e depois são colocados num pedestal que serve de apoio aos provetes, que funcionam como consolas (Figura 3.14). Este conjunto é colocado num recipiente com água e é exposto a ciclos térmicos repetidos de 24 horas, com uma variação térmica de -17,8 até 48,9 °C, até o provete atingir a rotura.

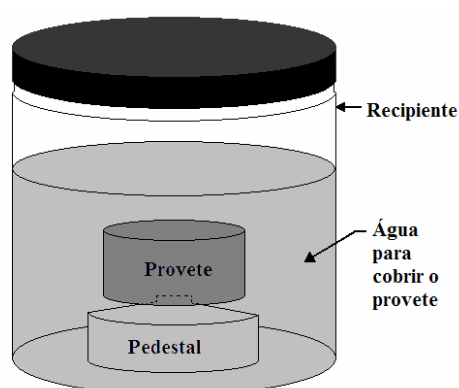


Figura 3.14 – Equipamento utilizado no ensaio de gelo-degelo em pedestal

As misturas betuminosas que atingiram a rotura dentro de 10 ciclos térmicos são susceptíveis à presença de água, e aquelas que resistem 20 a 25 ciclos térmicos são qualificadas como resistentes à presença de água. Terrel and Shute (1989) observaram que o efeito das

propriedades físicas dos agregados na ligação agregado-mastique é minimizado pela utilização de agregados de dimensão constante. Assim, este ensaio avalia, principalmente, a resistência da ligação na interface entre o mastique e os agregados e a coesão interna do mastique betuminoso.

Whiteoak (1990) descreve os ensaios mecânicos de imersão, nos quais se avalia a sensibilidade das misturas betuminosas à presença de água. Nesses ensaios, determina-se a alteração das propriedades mecânicas da mistura betuminosa (resistência à flexão, resistência ao corte, estabilidade no ensaio de Marshall ou resistência à compressão) como resultado da sua imersão em água. Neste contexto, as misturas betuminosas sensíveis à presença de água têm uma grande diminuição da resistência mecânica após imersão em água.

Um exemplo dos ensaios mecânicos de imersão é o ensaio de compressão com imersão (ASTM D1075; 37), amplamente usado para avaliar a perda de coesão em misturas betuminosas compactadas. Neste ensaio, o índice de resistência conservada (IRS – *Index of Retained Strength*) é obtido comparando a resistência à compressão de provetes não condicionados, com a resistência à compressão de outros provetes que foram submersos em água durante 4 dias a 49 °C (Figura 3.15). Terrel and Shute (1989) recomendam que as misturas betuminosas sejam rejeitadas se tiverem um IRS inferior ou igual a 75%.

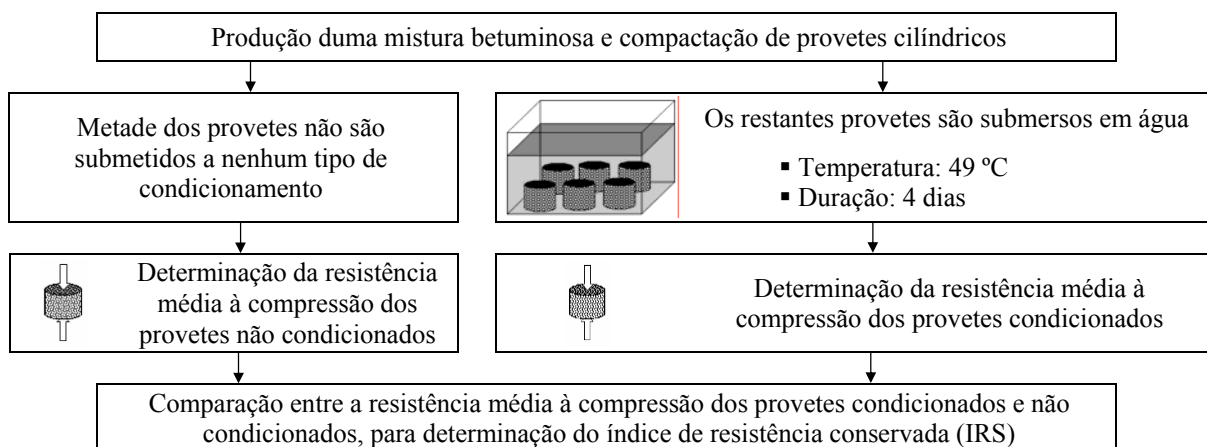


Figura 3.15 – Procedimentos do ensaio de compressão com imersão (ASTM D1075; 37)

O ensaio de Marshall com condicionamento (AASHTO T245) é o ensaio mecânico de imersão mais conhecido, sendo normalmente proposto nas especificações para garantir que o comportamento das misturas betuminosas não é comprometido pela presença de água. De facto, este ensaio é usado para avaliar a sensibilidade à presença de água das misturas

betuminosas, através da comparação entre a estabilidade de provetes não condicionados e a estabilidade de outros provetes condicionados.

Entre os diferentes procedimentos para o ensaio de Marshall com condicionamento, Whiteoak (1990) descreve a versão da *Shell*. Nesta versão do ensaio, preparam-se oito provetes, usando uma composição fixa para a mistura betuminosa. Quatro destes provetes são ensaiados de acordo com o método de Marshall, obtendo-se um valor de estabilidade Marshall padrão. Os restantes provetes são submetidos a um condicionamento em vácuo sob água, a uma temperatura entre 0 e 1 °C, e a uma imersão em água a 60 °C durante 48 horas. Finalmente, esses provetes são ensaiados para determinação da estabilidade Marshall (Figura 3.16). A estabilidade Marshall conservada é igual ao quociente entre o valor médio da estabilidade Marshall dos provetes condicionados e não condicionados.

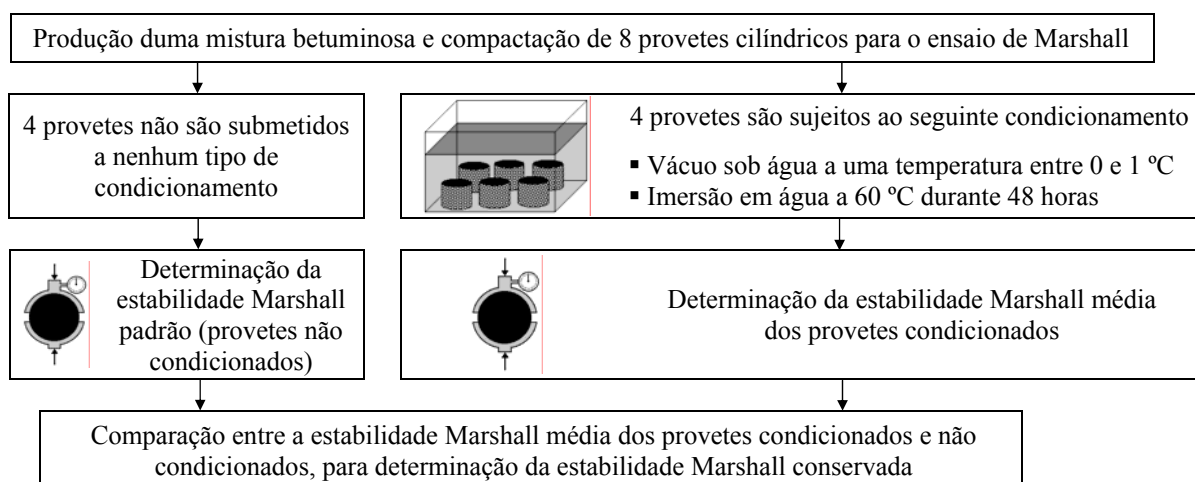


Figura 3.16 – Procedimentos da versão da *Shell* do ensaio de Marshall com condicionamento

Whiteoak (1990) descreve o ensaio *Wheel-Tracking* com imersão (IWTT – *Immersion Wheel-Tracking Test*), desenvolvido nos anos 50, que simula o efeito do tráfego quando a mistura betuminosa está submersa em água. Neste ensaio, determina-se o número de aplicações de carga até à ruína para misturas submersas em água a 40 °C, submetidas ao carregamento duma roda com 20 kg que faz um movimento de vaivém a 25 ciclos por minuto. A ruína é indicada pelo momento inicial em que ocorre uma variação significativa na deformação permanente do provete (rodeira) devido à presença de água. Já na altura em que o ensaio foi desenvolvido, Lee and Nicholas (1954) observaram uma boa correlação entre os resultados determinados neste ensaio e os problemas de perda de ligação agregado-mastique de misturas betuminosas utilizadas em estradas com um tráfego intenso e pesado.

O método desenvolvido por Lottman (1982_b) para a previsão de degradações originadas pela sensibilidade das misturas betuminosas densas à presença de água, normalmente denominado procedimento de Lottman, consiste em obter as relações de rigidez e de resistência à tracção indirecta entre provetes condicionados e não condicionados. Em relação ao condicionamento aplicado neste método, alguns provetes são submetidos apenas a saturação em vácuo, enquanto outros são submetidos a saturação em vácuo seguida por imersão em gelo e em água tépida, normalmente referida como gelo-degelo.

A saturação em vácuo consiste em imergir os provetes em água destilada com vácuo parcial (660mm Hg) durante 30 minutos, mantendo-se os provetes submersos durante 30 minutos adicionais, embora à pressão atmosférica. O gelo-degelo consiste em embrulhar num invólucro de plástico os provetes saturados em vácuo. Depois, os provetes são congelados durante 15 horas a uma temperatura entre -18 e -12 °C, e, após a remoção do invólucro de plástico, são aquecidos a 60 °C em água destilada, durante 24 horas.

Neste método, são ensaiados três provetes secos (não condicionados), outros três são ensaiados depois da saturação em vácuo e, finalmente, os últimos três são ensaiados depois da saturação em vácuo mais a acção de gelo-degelo. Os provetes são ensaiados para determinação da rigidez e da resistência à tracção indirecta, sendo calculados os valores médios dos resultados obtidos para cada conjunto de três provetes (Figura 3.17).

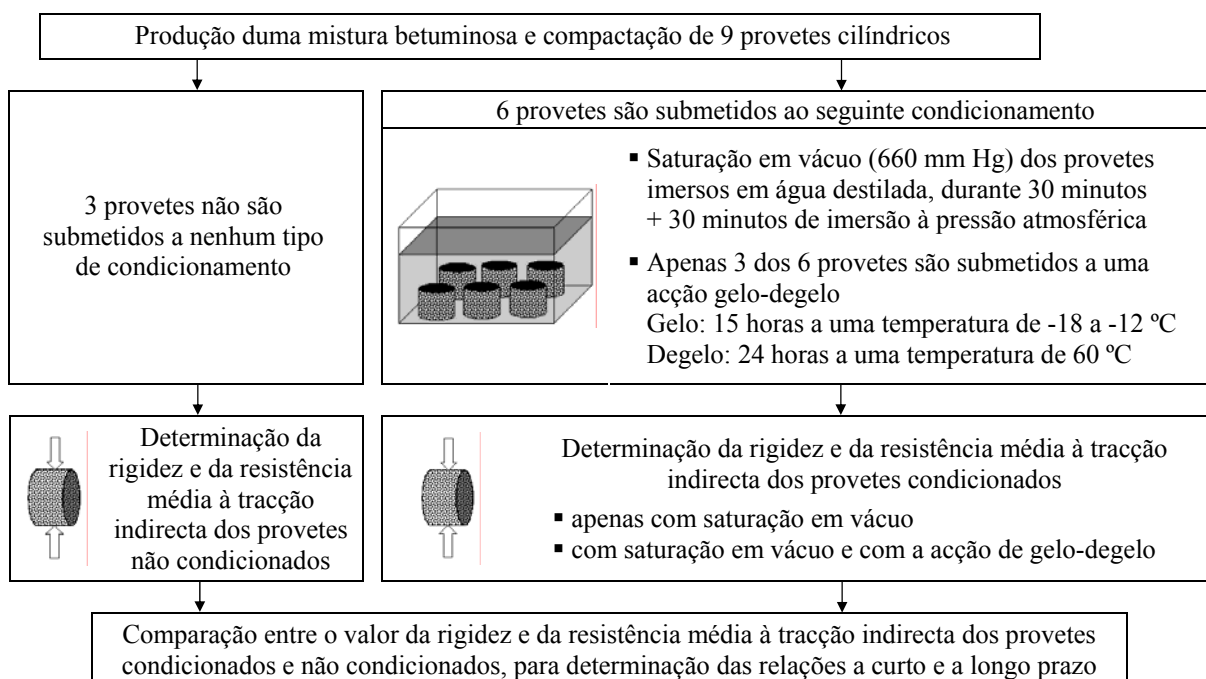


Figura 3.17 – Procedimentos do método de Lottman para avaliação da sensibilidade à água

Com base nos resultados médios calculados para a rigidez e para a resistência à tracção indirecta, são determinados os valores de duas relações (quocientes), nomeadamente:

- uma “relação de curto prazo” (*short-term ratio*), igual ao quociente entre os resultados obtidos nos provetes condicionados com saturação em vácuo e nos provetes secos;
- uma “relação de longo prazo” (*long-term ratio*), igual ao quociente entre os resultados dos provetes condicionados com saturação em vácuo mais gelo-degelo e nos provetes secos.

Em comparação com os resultados obtidos em laboratório, Lottman (1982_a) concluiu que, no pavimento, as “relações de curto prazo” são alcançadas dentro de quatro anos, e que a “relação de longo prazo” pode ser alcançada logo ao fim de cinco anos. O mesmo autor também observou que a perda de ligação agregado-mastique, devido à presença de água, é avaliada mais correctamente utilizando ensaios de tracção.

Tunncliff and Root (1984) também descrevem um método para previsão das degradações originadas pela sensibilidade à água das misturas betuminosas. O método consiste em determinar o quociente entre a resistência à tracção indirecta de provetes condicionados e não condicionados. O condicionamento de Tunncliff and Root envolve a imersão dos provetes em água destilada e a aplicação incremental dum vácuo parcial de 508mm Hg (5 minutos para cada incremento) até ser alcançado um grau de saturação em água de 55 a 80%, seguindo-se o aquecimento dos provetes num banho de água destilada a 60 °C durante 24 horas.

Terrel and Al-Swailmi (1994) descrevem um método de ensaio desenvolvido para avaliar a sensibilidade das misturas betuminosas à degradação induzida pela água: o sistema de condicionamento ambiental (ECS – *Environmental Conditioning System*). Na Figura 3.18 pode observar-se o equipamento para realização do ensaio ESC, no qual são condicionados e ensaiados os provetes, e cujos principais elementos constituintes são os seguintes: i) um sistema de condicionamento de água; ii) um sistema de carga; iii) uma câmara climática.

O sistema de condicionamento de água é utilizado para humedecer o provete e determinar a permeabilidade ao ar e à água da mistura betuminosa. Também permite verificar o pH da água destilada que humedece o provete assim como as temperaturas do provete e da água. O sistema de carga é formado por um servo sistema electro-pneumático em circuito fechado e por uma célula triaxial modificada que também é utilizada como estrutura de carga. A estrutura de carga triaxial é alojada dentro duma câmara climática que é capaz de alcançar uma larga gama de temperaturas e de níveis de humidade (até 95% de humidade relativa).

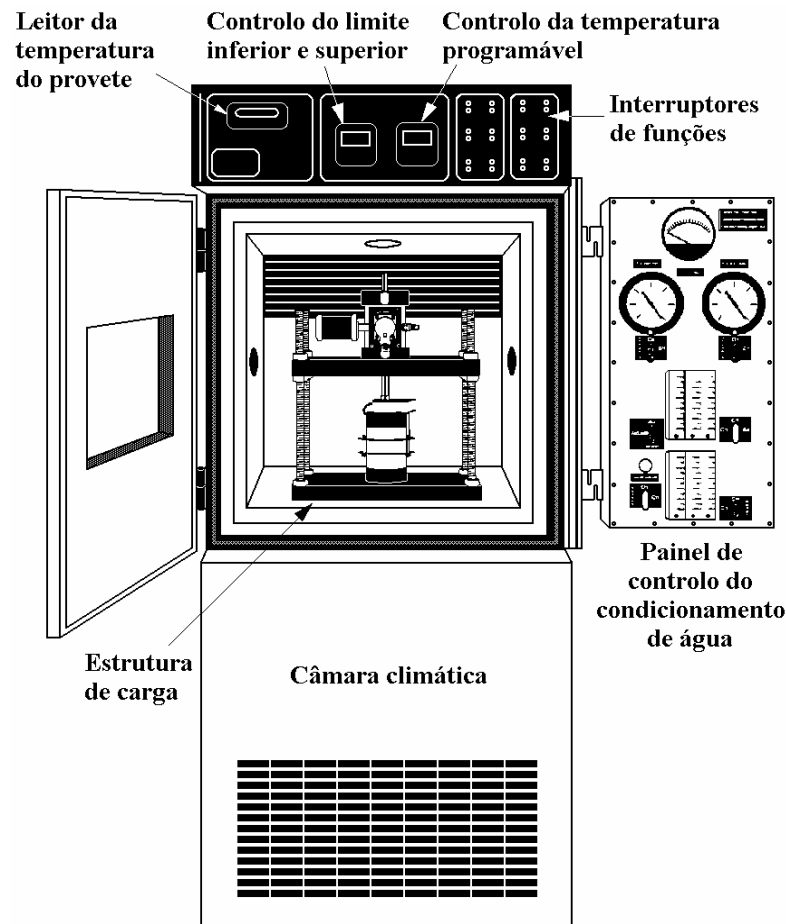


Figura 3.18 – Equipamento utilizado para realização do ensaio ECS (Harrigan et al., 1994)

No ensaio ECS, um provete cilíndrico, com diâmetro e altura de 102 mm, é ensaiado numa estrutura de carga triaxial, embora se utilize uma configuração de ensaio com tensão de confinamento nula. A câmara climática permite a aplicação de ciclos térmicos (é possível aquecer o provete desde uma temperatura de 25 °C até 100 °C e arrefecê-lo a -20 °C em 2 horas) e garante o nível de humidade necessário, enquanto o provete é submetido a determinado tipo de carregamento na estrutura de carga.

Os procedimentos a utilizar para realização do ensaio ECS são descritos, numa forma resumida e sequencial, no Quadro 3.6.

Allen and Terrel (1994) observaram que, com base nos resultados do ensaio ECS, é possível avaliar as misturas betuminosas que têm um bom ou um mau desempenho no pavimento na presença de água. Os mesmos autores referem que a degradação originada em laboratório com o ensaio ECS é superior à degradação observada no pavimento após 5 anos de serviço.

Quadro 3.6 – Resumo dos procedimentos do ensaio ECS (Scholz, 1995)

Passo	Descrição
1	Preparar os provetes de ensaio usando o protocolo SHRP
2	Determinar as propriedades dos provetes (geometria e peso)
3	Envolver o provete com um vedante de silicone e uma membrana de látex (cura durante 24 horas)
4	Colocar o provete na estrutura de carga ECS e determinar a permeabilidade ao ar
5	Determinar o módulo resiliente triaxial do provete não condicionado (seco)
6	Aplicar 508 mm Hg de vácuo durante 10 minutos
7	Humedecer o provete com água destilada durante 30 minutos (508mm Hg de vácuo)
8	Determinar a permeabilidade à água do provete não condicionado
9	Aquecer o provete a 60 °C durante 6 horas, sob um carregamento repetido (124 kPa)
10	Arrefecer o provete para 25 °C durante pelo menos 2 horas. Medir a permeabilidade à água e o módulo resiliente triaxial do provete. Isto constitui um ciclo quente
11	Repetir os passos 9 e 10 durante mais dois ciclos quentes
12	Arrefecer o provete para -18 °C durante 6 horas, sem carregamento repetido
13	Aquecer o provete para 25 °C durante pelo menos 2 horas e medir a permeabilidade à água e o módulo resiliente triaxial do provete. Isto constitui um ciclo de congelação
14	Dividir o provete em partes e avaliar visualmente a percentagem de descolagem
15	Traçar o gráfico do módulo resiliente triaxial e da permeabilidade à água (relação entre valores obtidos para os provetes condicionados e não condicionados)

Finalmente, no Quadro 3.7, apresenta-se uma síntese dos diversos métodos de ensaio existentes para simulação laboratorial da sensibilidade à água das misturas betuminosas, assim como os procedimentos utilizados em que cada método de ensaio.

Quadro 3.7 – Ensaio de simulação da sensibilidade à água das misturas betuminosas

Método de ensaio para avaliação da sensibilidade à água		Procedimentos utilizados no método de ensaio						
		Imersão em água	Imersão química	Avaliação visual da descolagem	Avaliação química da descolagem	Saturação em vácuo	Ação de gelo-degelo	Realização de ensaios mecânicos
Sobre misturas betuminosas não compactadas	<i>Boiling Water Test</i>	X		X				
	Ensaio de Imersão Estática	X		X				
	Ensaio de Imersão Dinâmica	X		X				
	Ensaio de Imersão Química		X		X			
	<i>Net Adsorption Test</i> (Curtis et al., 1993)		X		X			
Sobre misturas betuminosas compactadas	<i>Freeze-Thaw Pedestal Test</i>			X			X	
	Ensaio de Compressão com Imersão	X						X
	Ensaio Marshall com condicionamento					X	X	X
	Ensaio <i>Wheel-Tracking</i> com imersão	X						X
	Método de Lottman (1982)					X	X	X
	Método de Tunnicliff and Root (1984)	X				X		X
	Ensaio ECS (1994)			X		X	X	X

Correlação entre os ensaios laboratoriais de sensibilidade à água e o desempenho *in situ*

Embora existam numerosas investigações sobre a sensibilidade das misturas de betuminosas à presença de água, apenas foram realizados dois estudos que permitem estimar a ligação agregado-mastique a longo prazo, nomeadamente, o trabalho de Lottman (1982_a e 1982_b) e o Sistema Condicionamento Ambiental – ECS (Allen and Terrel, 1994).

Lottman (1982_a) efectuou um estudo em oito pavimentos flexíveis com misturas betuminosas densas, que foram avaliados periodicamente durante aproximadamente cinco anos. Imediatamente após a construção, foram recolhidos tarolos nos pavimentos, com os quais se prepararam provetes que foram ensaiados utilizando o procedimento de Lottman (1982_b). Os resultados obtidos com o método de Lottman foram os seguintes:

- os valores iniciais (após construção) da rigidez e da resistência à tracção indirecta;
- os valores iniciais (após construção) das “relações de curto prazo e de longo prazo”.

Lottman (1982_a) fez uma comparação destes valores iniciais (após construção) com os mesmos valores determinados em tarolos retirados periodicamente do pavimento, e em provetes preparados em laboratório com os materiais aplicados no pavimento. Normalmente, os valores da rigidez, da resistência à tracção indirecta e das “relações de curto prazo e de longo prazo” obtidos a partir de tarolos retirados do pavimento são superiores aos obtidos em provetes preparados no laboratório, o que indica que os danos originados pela presença de água nas misturas betuminosas são sobrestimados quando se ensaiam provetes preparados em laboratório.

Nas misturas betuminosas com mais baixo valor inicial da “relação de longo prazo”, Lottman (1982_a) observou que esse valor, obtido em tarolos retirados do pavimento, começa a diminuir após dois a três anos de serviço. Nesse momento, observou-se um desenvolvimento significativo da perda de ligação agregado-mastique nas misturas betuminosas, tornando-se depois tão severo que originou a desagregação dos tarolos retirados do pavimento.

O valor da “relação de curto prazo” indica a possibilidade da perda de ligação agregado-mastique se desenvolver nos primeiros quatro anos de vida do pavimento. O valor da “relação de longo prazo” é um indicador do máximo nível de dano, devido à presença de água, alcançado em pavimentos com mais de cinco anos de idade.

De acordo com Lottman (1982_a), as misturas betuminosas densas com um valor elevado (superior a 80%) da “relação de longo prazo” resistem bem aos mecanismos de degradação originados pela presença de água. Por outro lado, as misturas betuminosas com um valor reduzido da “relação de longo prazo” são propensas à perda de ligação agregado-mastique, e não garantem um bom desempenho, a longo prazo, quando aplicadas no pavimento.

Na tentativa de validar o ECS, Allen and Terrel (1994) procederam à comparação dos resultados do ensaio ECS, realizado sobre misturas betuminosas produzidas com os materiais utilizados nos pavimentos em estudo, com os resultados de ensaios em que se determinou o módulo de rigidez de tarolos extraídos desses pavimentos, após 5 anos de serviço. Os resultados do ensaio ECS também foram comparados com os resultados de ensaios de deformação permanente efectuados em equipamentos de ensaio *Wheel Tracking*.

Relativamente à sensibilidade à presença de água, Allen and Terrel (1994) mostraram que o ECS consegue fazer a discriminação entre as misturas betuminosas com bom ou mau desempenho. No entanto, a degradação originada pelo procedimento ECS foi superior à observada em tarolos extraídos do pavimento, em 8 das 12 misturas betuminosas avaliadas. Determinados factores perturbadores, como o envelhecimento do betume, a variação nas condições ambientais entre os diferentes locais de estudo *in situ*, e o tempo relativamente reduzido no qual as misturas betuminosas estiveram em serviço, são razões prováveis para a falta de correlação obtida.

O ECS demonstrou ter uma correlação razoavelmente boa com os ensaios de deformação permanente realizados no *Wheel Tracking* do LCPC, em misturas betuminosas que tinham sido degradadas por água através dum procedimento semelhante ao usado no ECS.

3.8. Aditivos e Tratamentos “Anti-descolagem”

Nas misturas betuminosas, a ligação entre o mastique e determinados tipos de agregado pode ser aumentada pela utilização de aditivos químicos, denominados de aditivos anti-descolagem ou ASA (*Anti-Stripping Agents*), ou através de tratamento dos agregados. Os aditivos actuam, geralmente, através de um dos seguintes modos:

- modificando as condições de interface entre o betume e os agregados, para que o betume envolva mais adequadamente os agregados;

- reforçando a ligação adesiva entre os agregados e o betume, melhorando desse modo a resistência à descolagem do betume a longo prazo, quando a água entrar em contacto com o sistema de betume e agregados.

Os ASAs mais utilizados são a cal hidráulica e os derivados químicos da amónia (aminas). A cal hidráulica é utilizada tradicionalmente como aditivo anti-descolagem em misturas betuminosas, sendo incorporada como parte do filer (1 a 3% do peso dos agregados).

Por um lado, assume-se que a cal hidráulica reage com os ácidos carboxílicos existentes no betume, permitindo que outros grupos funcionais do betume (como as cetonas) reajam com os agregados, ligando-se à superfície destes. A água não consegue remover estes componentes do betume (cetonas) com a mesma facilidade que remove os ácidos carboxílicos, fazendo com que a mistura betuminosa se torne menos susceptível à descolagem na presença de água. Por outro lado, Whiteoak (1990) sugeriu que, quando existe água na interface entre os agregados e o betume, a cal hidráulica adicionada às misturas betuminosas reage com a água da interface, dando origem a cal hidratada. Os iões de cálcio da cal hidratada tornam a superfície dos agregados básica, e o balanço electro-químico na interface entre os agregados e o betume afasta a água da superfície dos agregados para uma emulsão dentro do betume. Neste contexto, o betume consegue ligar-se melhor à superfície hidrófoba do agregado.

As aminas³² primárias, compostas por moléculas formadas por longas cadeias, são a base de um elevado número de ASAs. As aminas, catiónicas por natureza, são atraídas pela superfície dos agregados. O outro extremo das moléculas é uma longa cadeia hidrocarbonada que é compatível com o betume. O resultado é uma ligação iónica cruzada entre os agregados e o betume. Os ASAs tipo amina reduzem a tensão superficial da superfície dos agregados, permitindo ao betume ligar-se a uma maior superfície de agregados disponível para adesão.

Normalmente, a quantidade de aminas a utilizar na mistura betuminosa varia entre 0,1 e 1% (do peso de betume). As aminas podem ser adicionadas ao betume ou ser pré-envolvidas nos agregados (técnica mais eficaz), antes da mistura entre os agregados e o betume.

Apesar da ligação agregado-mastique inicial ser aumentada, é questionável a eficácia de alguns aditivos ASA para melhorar a ligação agregado-mastique a longo prazo, quando a

³² Nome genérico dado a um composto orgânico cuja fórmula pode ser obtida do amoníaco, substituindo um ou mais átomos de hidrogénio por igual número de alquilos (radicais, formados por carbono e hidrogénio).

mistura betuminosa está na presença de água por períodos prolongados. Além disso, a experiência em obra demonstrou que diferentes combinações de betume e agregados requerem diferentes tipos e quantidades de aditivos.

Também se pode melhorar a ligação agregado-mastique das misturas betuminosas modificando a superfície dos agregados pela adição de catiões metálicos, incluindo o alumínio, o magnésio, o ferro e o cálcio. Entre os diversos catiões metálicos, a adição de ferro melhora a ligação agregado-mastique dum modo mais eficaz. Curtis et al. (1993) referem que a modificação da superfície dos agregados por catiões metálicos é mais eficaz do que a incorporação de aditivos ASA no betume. A modificação da superfície dos agregados por catiões metálicos implica que estes se tornem parte da superfície dos agregados, para não serem prontamente retirados pela água, o que se consegue tratando os agregados numa solução de catiões, seguindo-se uma secagem dos agregados com ar quente.

Além dos aditivos, também podem ser utilizados tratamentos anti-descolagem, que consistem em pré-envolver os agregados por organo-silanos³³ (tiol-silanos, hidrocarbono-silanos e amino-silanos). Num estudo realizado por Curtis et al. (1993), no qual foram avaliados diversos tipos de organo-silanos, os amino-silanos demonstraram ser os mais eficazes, melhorando sempre as características da ligação agregado-mastique.

A borracha de estireno-butadieno (SBR) também pode ser utilizada como aditivo para pré-tratamento dos agregados, de modo a diminuir a absorção de betume pelos agregados e a melhorar a ligação agregado-mastique, nas misturas betuminosas. A adição de SBR melhora a ligação agregado-mastique, em princípio, porque este aditivo aumenta as áreas de contacto entre o betume e os agregados. Curtis et al. (1993) demonstrou que são necessárias quantidades elevadas de SBR para envolver adequadamente os agregados. Assim, e devido ao elevado custo deste aditivo, a sua utilização é praticamente inviável.

No trabalho realizado por Curtis et al. (1993) durante o programa SHRP, foi desenvolvido um ensaio que permite determinar a quantidade óptima de aditivo a ser adicionado ao sistema de betume e agregado, baseado no princípio que o teor óptimo em aditivo é aquele que vai reagir com a superfície dos agregados, porque além deste limite o aditivo pode ter um efeito prejudicial. Esse ensaio consiste em preparar uma amostra de betume+aditivos+agregados,

³³ Diz-se de um composto orgânico em cuja molécula há uma ligação de carbono com um composto binário de silício e de hidrogénio.

que é aquecida durante 2 horas. O betume é dissolvido e o aditivo que não reagiu é removido, determinando-se, assim, a quantidade de aditivo que reagiu com a superfície dos agregados.

Curtis et al. (1993) observaram que a resistência da ligação entre o betume e os agregados na presença dum aditivo dependia da extensão da cura. A cura é definida como o grau de reacção do aditivo com o betume e com os agregados, na superfície dos agregados.

Estes autores desenvolveram uma técnica para aplicação dos aditivos nas misturas betuminosas, de modo a diminuir a quantidade de ASA necessários para manter uma ligação agregado-mastique adequada, e que consiste em dissolver os aditivos ASA numa solução de pré-tratamento (sílica aquosa coloidal ou emulsões à base de água). O equipamento esquematizado na Figura 3.19, permite misturar esta solução com os agregados de forma mais eficaz, garantindo um adequado envolvimento dos agregados com menos aditivo.

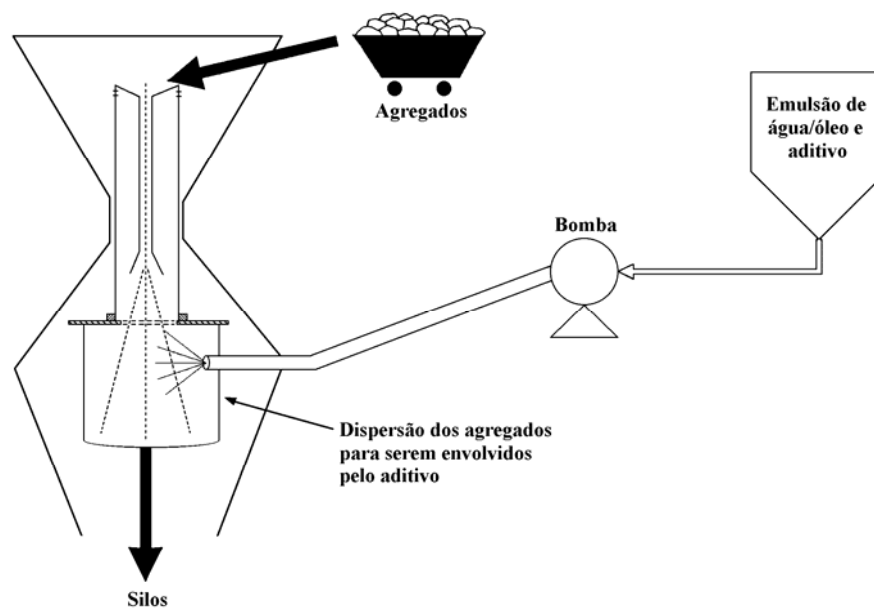


Figura 3.19 – Equipamento para aplicação dos aditivos nos agregados (Curtis et al., 1993)

3.9. Conclusões

Ao longo deste capítulo fez-se uma síntese dos conhecimentos sobre a composição e o comportamento do mastique, a sua influência no comportamento das misturas betuminosas, os mecanismos de ligação agregado-mastique das misturas betuminosas, e os fenómenos que afectam a ligação agregado-mastique das misturas betuminosas em serviço.

Inicialmente, fez-se uma revisão sobre as principais definições de mastique betuminoso e sobre os motivos que as determinaram, e apresentou-se a definição de mastique utilizada neste trabalho, de modo a representar o aglutinante betuminoso a ser estudado.

Uma vez que se pretende analisar a contribuição do mastique para o desempenho das misturas betuminosas, em seguida fez-se uma síntese dos trabalhos existentes sobre mastique e sobre os materiais que o compõem (filer, agregados finos e betume), assim como sobre a sua influência, ou dos seus materiais constituintes, no desempenho das misturas betuminosas.

O comportamento do mastique depende da proporção filer/betume, havendo uma proporção “ótima” para a qual o mastique, e por inerência a mistura betuminosa, maximizam o seu desempenho. O comportamento do mastique também depende das características do filer e do betume, e a forma como estes dois elementos se conseguem interligar constitui um elemento fundamental para um adequado comportamento das misturas betuminosas.

Essencialmente, concluiu-se que o filer é o elemento com maior influência no comportamento do mastique e das misturas betuminosas. O ensaio mais utilizado para caracterizar o filer, e que melhor se correlaciona com o comportamento do mastique e da mistura betuminosa, é o ensaio para determinação do volume de vazios de Ridgen.

Os ensaios para determinação da viscosidade cinemática e da temperatura de amolecimento (pelo método “anel e bola”), normalmente aplicados para caracterizar o betume, são os mais utilizados para caracterização do mastique betuminoso. Neste contexto, depois de adicionada uma certa quantidade de filer ao betume para formar o mastique, avalia-se o aumento da viscosidade ou da temperatura de amolecimento em relação a esse mesmo betume. O comportamento do mastique, avaliado nestes ensaios, tem uma boa correlação com as propriedades das misturas betuminosas, possibilitando a previsão de um bom ou mau desempenho no pavimento por parte das misturas que utilizem esse mastique.

Relativamente à ligação agregado-mastique, esta depende essencialmente das características da superfície dos agregados, embora a composição do betume também tenha uma influência considerável. As propriedades da ligação agregado-mastique devem ser determinadas pela natureza física e química dessa ligação. Por sua vez, quando as misturas betuminosas estão em serviço no pavimento, as propriedades da ligação agregado-mastique são influenciadas sobretudo pela presença de água e, em menor escala, pelo envelhecimento do betume.

Os principais mecanismos de degradação devido à existência de água nas misturas betuminosas são os seguintes: i) deslocação na interface entre o betume e os agregados; ii) separação entre o betume e os agregados; iii) desgaste hidráulico; iv) rotura do filme de betume; v) empolamento e escavação; vi) pressão intersticial; vii) descolagem química.

No entanto, Curtis et al. (1993) destacam os seguintes modos de rotura da ligação entre o betume e os agregados:

- separação da ligação na interface entre o betume e os agregados;
- rotura no próprio betume após perda dos seus componentes solúveis;
- rotura coesiva nos agregados;
- separação de fase de componentes do betume, quando a presença de água aumenta a solubilidade dos componentes polares do betume, por ligação com o hidrogénio.

A uma escala macroscópica, as degradações originadas pela presença de água podem ser manifestadas pela perda de ligação na interface agregado-mastique (descolagem), pela perda de coesão interna dos componentes da mistura betuminosa (redução da rigidez) ou, em casos mais graves, pela desagregação superficial das misturas betuminosas.

A viscosidade do betume depende do teor em asfaltenos e saturados, e do poder dispersante das resinas e aromáticos. O envelhecimento do betume, ao longo do tempo, corresponde a um aumento da quantidade de asfaltenos e saturados. O envelhecimento do betume resulta de mudanças na sua composição, causadas, principalmente, pela oxidação atmosférica de certos componentes do betume que formam moléculas profundamente polares e interactivas, que influenciam a polaridade do betume, a resistência das associações das moléculas polares e a capacidade de dispersão dos componentes não associados no meio solvente.

O envelhecimento do betume resulta num aumento da sua viscosidade e polaridade. O aumento da viscosidade do betume significa, ao mesmo tempo, um aumento do módulo de rigidez e uma diminuição da flexibilidade do ligante betuminoso, o que pode traduzir-se por uma menor resistência ao fendilhamento. O aumento da polaridade do betume origina uma melhoria da ligação entre o betume e os agregados, com o conseqüente aumento da resistência da ligação agregado-mastique das misturas betuminosas. No entanto, na presença de água, o aumento da polaridade do betume também aumenta a perda de ligação agregado-mastique, porque as moléculas mais polares do betume têm uma maior aptidão para se ligarem à água, descolando-se com facilidade dos agregados.

Os ensaios de caracterização da ligação agregado-mastique das misturas betuminosas permitem, de facto, avaliar os principais factores que afectam as propriedades desta ligação em serviço, nomeadamente, os ensaios de envelhecimento e de sensibilidade à água.

Os ensaios de envelhecimento do betume consistem, normalmente, em aquecer camadas finas de betume numa estufa. Estes ensaios prevêm adequadamente o endurecimento do betume durante a mistura em central e, em muitos casos, o endurecimento do betume em serviço nos pavimentos. Os principais ensaios de envelhecimento de misturas betuminosas também consistem no aquecimento destas numa estufa. A principal vantagem de envelhecer misturas betuminosas, em comparação com os ensaios de envelhecimento do betume, é o facto dos primeiros considerarem a influência efectiva dos agregados no envelhecimento do betume.

Os ensaios de sensibilidade à água são utilizados para avaliar o comportamento das misturas betuminosas na presença de água, nomeadamente, a rotura da ligação entre o betume e os agregados (perda de adesividade) e a redução da rigidez e da resistência da mistura betuminosa (perda de coesão). Esses ensaios são, em grande parte, empíricos e, como consequência, demonstram uma fraca exactidão na previsão do desempenho *in situ*. Actualmente, nenhum ensaio de sensibilidade à água foi validado totalmente para uma larga gama de materiais e condições climáticas.

O estudo dos aditivos e tratamentos anti-descolagem utilizados para impedir, ou retardar, a perda de ligação agregado-mastique das misturas betuminosas permitiu concluir que estes produtos actuam, geralmente, dum dos seguintes modos:

- modificando as condições de interface entre o betume e os agregados, para que o betume envolva mais adequadamente os agregados;
- reforçando a ligação adesiva entre os agregados e o betume, melhorando desse modo a resistência à descolagem do betume a longo prazo, quando a água entrar em contacto com o sistema de betume e agregados.

Os aditivos anti-descolagem mais utilizados são a cal hidráulica e os derivados químicos da amónia (aminas). Também se pode tratar a superfície dos agregados pela adição de catiões metálicos ou através dum pré-envolvimento dos agregados com organo-silanos ou com borracha de estireno-butadieno (SBR). Os aditivos e os tratamentos anti-descolagem melhoram significativamente a ligação agregado-mastique, sobretudo para as misturas betuminosas que utilizam agregados com fracas características de ligação.