



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Ciências da Terra

Misturas betuminosas a quente.
Uma análise à abordagem empírica e fundamental da
norma de produto.

Joana Rita Carvalho dos Santos

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA E MINAS

Setembro, 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
Departamento de Ciências da Terra

Misturas betuminosas a quente.
Uma análise à abordagem empírica e fundamental da
norma de produto.

Joana Rita Carvalho dos Santos

MESTRADO EM ENGENHARIA GEOLÓGICA E DE MINAS
Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia
Geológica e de Minas

Orientadores científicos:

Prof. Doutor Mário de Oliveira Quinta Ferreira, Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra

Prof. Doutor Fernando Varela Mathias Castello Branco, Faculdade de Ciências e
Tecnologia da Universidade de Coimbra

Setembro, 2016

Resumo

O uso de métodos de formulação de misturas betuminosas tem por objetivo determinar a combinação ótima de agregados e betume numa mistura, de modo a obter-se um material com características funcionais e estruturais próprias para cada camada, o mais económico possível e com uma longevidade adequada.

As misturas betuminosas colocadas nas camadas de pavimentos flexíveis podem diferir no tipo de agregado e na sua granulometria, tipo e na quantidade de ligante, na utilização de aditivos ou agentes que modificam o betume e na composição volumétrica.

A prática portuguesa é a de utilizar o método de Marshall (método empírico) para formular misturas betuminosas convencionais e até algumas misturas não convencionais. Embora com muita experiência a nível nacional e internacional, este método apresenta uma série de desvantagens e inconvenientes que já são perfeitamente ultrapassáveis com o recurso a outros métodos de ensaio.

Na presente dissertação pretendem-se apresentar métodos para a formulação de misturas betuminosas a quente, conformes com a norma de produto NP EN 13108-1, mas ainda sem uma aplicação generalizada a nível nacional.

Será apresentada uma comparação entre as características mínimas necessárias em cada uma das misturas betuminosas, para duas concessionárias rodoviárias portuguesas, sendo abordado em pormenor a comparação entre os fusos granulométricos para cada uma das misturas betuminosas.

É realizado um paralelismo exaustivo à abordagem empírica e fundamental da norma de produto rematando com uma análise económica a ambas abordagens.

Finalmente será feita uma alusão ao método de formulação Francês, que será comparado com a metodologia desenvolvida em Portugal. Serão consideradas as misturas betuminosas a quente para pavimentos rodoviários flexíveis incluídas na EN 13108-1. Excluem-se as misturas betuminosas usadas em aeroportos.

Palavras-chave: Pavimentos Flexíveis, Formulação de Misturas Betuminosas, Abordagem Empírica, Abordagem Fundamental.

Abstract

The use of bituminous mixtures formulation methods aimed the determination of the optimal combination of aggregate and bitumen in a mixture in order to obtain a material with functional and structural characteristics for each layer, as economically as possible and with the proper longevity.

The bituminous mixtures placed in flexible pavement layers may differ in the type of aggregate and particle size, the type and amount of binder, the use or not of additives or agents which modify the bitumen and its volumetric composition.

The Portuguese practice is to use the Marshall method (empirical method) to formulate conventional bituminous mixtures and even some unconventional ones. Although with a lot of experience at national and international level, this method has a number of disadvantages and drawbacks which are perfectly overpass with the resource of other test methods.

This thesis intend to present test methods for the formulation of bituminous hot mixes, in accordance with the product standard EN 13108-1, still without national implementation.

A comprehensive parallelism to empirical and fundamental approach to product standard finishing with an economic analysis of both approaches is performed.

Finally there will be an allusion to the French formulation method that is compared with the methodology developed in Portugal

Will be considered hot bituminous mixtures for flexible road pavements included in EN 13108-1. Are excluded bituminous mixtures used in airports.

Key-words

Flexible Pavements, Hot bituminous mixtures formulation, Empirical Approach, Fundamental Approach.

Em memória do muito amado João Afonso.

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível com a ajuda de várias pessoas as quais deixo aqui o meu agradecimento:

Ao professor Doutor Mário Quinta pela orientação prestada, disponibilidade e preocupação, pela enorme ajuda na eliminação do que é acessório e reconhecimento no que é importante e fundamental.

A todos os colegas que me deram força e incentivo para a conclusão desta tese.

A todos os familiares que me deram tanto apoio de modo a que pudesse ter tempo disponível para a realização desta dissertação.

Ao Pedro pelas inúmeras palavras de incentivo e motivação.

À Madalena, pelo tempo que não pude estar com ela para realizar esta tese.

Nota:

À data da realização desta tese as Estradas de Portugal foram convertidas em Infraestruturas de Portugal. O Caderno de Encargos (agora das Infraestruturas de Portugal) manteve a nomenclatura anterior e continuou a designar-se por “Caderno de Encargos das Estradas de Portugal” pelo que foi assim designado na bibliografia, embora no corpo do texto haja diversas referências às Infraestruturas de Portugal.

Índice

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Justificação e enquadramento do tema | 1 |
| 1.2. Objetivos | 2 |
| 1.3. Estrutura do trabalho | 2 |
| 2. Pavimentos Rodoviários Flexíveis | 4 |
| 2.1 Definição | 4 |
| 2.2 Características gerais das misturas betuminosas | 6 |
| 2.3 Constituintes das misturas betuminosas | 8 |
| 2.3.1 Agregados | 8 |
| 2.3.2 Fíler | 10 |
| 2.3.3 Composição da mistura de agregados | 10 |
| 2.3.4 Ligante | 11 |
| 3. Formulação de misturas betuminosas | 13 |
| 3.1 Tipos de formulações | 13 |
| 3.1.1 Definição por especificação (métodos receita) | 14 |
| 3.1.2 Métodos de formulação empíricos | 15 |
| 3.1.3 Métodos de formulação analíticos | 16 |
| 3.1.4 Métodos de formulação volumétricos | 17 |
| 3.1.5 Métodos de formulação relacionados com o desempenho | 18 |
| 3.1.6 Métodos de formulação baseados no desempenho | 19 |
| 3.2 Comparação entre o método de formulação usado pelo Anexo Nacional, IP e BRISA | 19 |
| 3.3 Considerações Finais | 23 |
| 4. Ensaios usados na formulação de misturas betuminosas a quente | 25 |
| 4.1 Fabrico de misturas em laboratório | 25 |
| 4.2 Compactação de provetes em laboratório | 25 |
| 4.3 Ensaio Marshall | 26 |
| 4.4 Determinação da Baridade Máxima Teórica | 27 |
| 4.5 Determinação da baridade de provetes compactados | 28 |
| 4.6 Ensaio da Resistência às Deformações Permanentes – Ensaio de Pista | 31 |
| 4.7 Sensibilidade à água | 32 |
| 4.8 Determinação das características volumétricas de provetes betuminosos | 34 |
| 4.9 Índice de Resistência Conservada | 36 |
| 4.10 Medição da temperatura | 36 |
| 4.11 Rigidez | 37 |

| | | |
|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.12 | Fadiga | 38 |
| 4.13 | Ensaio de PCG (presse à cisaillement giratoire) - Prensa de cisalhamento giratória | 40 |
| 4.14 | Considerações finais | 40 |
| 5. | Comparação entre fusos granulométricos da IP e da Brisa | 42 |
| 5.1 | Camadas de Base | 42 |
| 5.1.1 | Macadame betuminoso (Brisa) versus o AC 20 Base (MB) (IP) | 43 |
| 5.1.2 | Betão betuminoso de Alto Módulo- camada de base versus AC 20 Base (MBAM) (IP) | 44 |
| 5.2 | Camadas de Regularização | 45 |
| 5.2.1 | Betão betuminoso de Alto Módulo para camada de regularização (Brisa) versus o AC 16 Bin (MBAM) (IP) | 45 |
| 5.2.2 | Mistura Betuminosa Densa (Brisa) versus o AC 20 Bin (MBD) (IP) | 46 |
| 5.2.3 | Betão Betuminoso subjacente (BRISA) versus AC 14 Bin (BB) (IP) | 47 |
| 5.2.4 | Microbetão Betuminoso (BRISA) versus AC 14 Reg (BB) (IP) | 48 |
| 5.3 | Camadas de Desgaste | 49 |
| 5.3.1 | Betão Betuminoso para camada de desgaste (BRISA) versus AC 14 Surf (BB) (IP) | 50 |
| 5.3.2 | Betão Betuminoso rugoso (BRISA) versus AC 14 Surf (BBr) (IP) | 51 |
| 5.3.3 | Betão Betuminoso drenante (BRISA) versus PA 12,5 (BBd) (IP) | 52 |
| 5.4 | Considerações finais | 53 |
| 6. | Abordagens Empírica e Fundamental | 54 |
| 6.1 | Norma de produto NP EN 13108-1 | 54 |
| 6.2 | Um exemplo do uso da abordagem fundamental | 60 |
| 6.3 | Análise Económica | 64 |
| 6.4 | Considerações finais | 67 |
| 7. | Conclusões | 68 |
| | Referências Bibliográficas | 70 |
| | REFERÊNCIAS NORMATIVAS | 73 |
| | ANEXO I | 75 |

Índice de Tabelas

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2.1- Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário (Inlr, 2016) | 5 |
| Tabela 2.2 Novas Nomenclaturas das misturas betuminosas (NP EN 13108-1) | 7 |
| Tabela 3.1 Categorias de Métodos de formulação e respetivos critérios (adaptado de (Francken, 1998)) | 14 |
| Tabela 6.1 Comparação entre os RG, RE, RF e AN | 56 |
| Tabela 6.2- Exemplo de características mínimas das misturas betuminosas com a abordagem empírica, para camadas de Desgaste e Base, Anexo C (Sétra, 2008)..... | 62 |
| Tabela 6.3- Exemplo de características das misturas betuminosas com a abordagem fundamental, para camadas de Desgaste e Base, Anexo D (Sétra, 2008) | 62 |
| Tabela 6.4- Comparação entre os ensaios usados nas formulações em Portugal e França | 63 |
| Tabela 6.6-Comparação entre abordagens..... | 64 |
| Tabela 6.7- Estimativa de preço para os ensaios usados na Formulação Marshall | 65 |
| Tabela 6.8- Estimativa de preço dos ensaios de sensibilidade à água e Pista | 65 |
| Tabela 6.9 – Estimativa de preço de ensaios adicionais usados pela abordagem fundamental | 66 |

Índice de Figuras

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 2.1-Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (Inlr, 2016)..... | 4 |
| Figura 2.2 - Composição Volumétrica das misturas betuminosas (Murtinheira, 2011) | 6 |
| Figura 2.3- Agregado Natural, Origem Granítica (LGMC, 2016)..... | 9 |
| Figura 2.4- Agregado Artificial, ASIC- Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (Oliveira, 2016) | 9 |
| Figura 2.5 - Agregado Reciclado, agregado obtido após fresagem de camada de mistura betuminosa (Antunes, 2016) | 9 |
| Figura 2.6- Curva contínua e curva descontínua (LGMC, 2016)..... | 11 |
| Figura 3.1- Formulação pelo método Marshall: representação gráfica da variação das características de uma mistura betuminosa com a percentagem em betume (LGMC, 2016) | 21 |
| Figura 4.1-Exemplo Lei de Fadiga (LGMC,2016)..... | 39 |
| Figura 4.2 Ensaio de (PCG) Prensa de cisalhamento giratória (Institut fur Materialprufung, 2016) | 40 |
| Figura 5.1 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Macadame Betuminoso Versus AC 20 Base (MB)) | 43 |
| Figura 5.2 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Alto Módulo Versus AC 20 Base (MBAM))... .. | 44 |
| Figura 5.3 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Alto Módulo Reg Versus AC 16 Bin (MBAM)) | 45 |
| Figura 5.4 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Densa Versus AC 20 Bin (MBD))..... | 46 |
| Figura 5.5 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. subjacente Versus AC 14 Bin (BB)) | 47 |
| Figura 5.6 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Microbetão Betuminoso Versus AC 14 Reg (BB)) | 48 |
| Figura 5.7 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Camada de Desgaste Versus AC 14 Surf (BB)) | 50 |
| Figura 5.8 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Rugoso Versus AC 14 Surf (BBr))..... | 51 |
| Figura 5.9 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Drenante Versus PA 12,5 (BBd)) | 52 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|-------|------------------------------------|
| Brisa | Concessionária Privada de Estradas |
| IP | Infraestruturas de Portugal |
| EP | Estradas de Portugal |
| CE | Caderno de Encargos |
| AN | Anexo Nacional |
| D | Máxima dimensão dos agregados |
| RE | Requisitos Empíricos |
| RG | Requisitos Gerais |
| RF | Requisitos Fundamentais |
| PCG | Presse à cisaillement giratoire |

1. Introdução

1.1. Justificação e enquadramento do tema

A rede rodoviária nacional com 17874 km de extensão (Portugal, 2010), é constituída na sua grande maioria por pavimentos flexíveis. Os pavimentos flexíveis são constituídos por um conjunto de camadas horizontais, colocadas sobre uma fundação, que têm como função principal suportar as ações induzidas pelo tráfego, redistribuindo as tensões transmitidas as fundações, proporcionando uma superfície segura e confortável para a circulação de veículos.

Os pavimentos flexíveis são constituídos essencialmente por misturas betuminosas. Estas são compostas por agregados e betume, em que os agregados desempenham o papel de esqueleto granular e o betume é usado como agente de ligação entre as partículas de agregados.

É sobre o modo de obtenção da composição ótima entre o esqueleto granular e a quantidade de betume e as características finais de desempenho das misturas betuminosas que se debruça esta dissertação.

Uma mistura betuminosa tem cerca de 95% em agregados e 5% em betume. As variações das percentagens em betume numa mistura betuminosas dependem de inúmeros fatores, tais como as dimensões dos agregados, a natureza destes, a afinidade entre agregados e o betume e o tipo de betume. A variação de 0,1% de betume em várias toneladas de uma mistura betuminosa irá trazer um acréscimo ou diminuição significativa no preço final de um pavimento. Ressalve-se que num país como Portugal, onde existem inertes com bastante abundância e qualidade, o preço das misturas betuminosas encontra-se na sua maioria no betume.

Por este motivo, numa primeira fase, a formulação das misturas betuminosas, que tem por objetivo determinar a combinação de agregados e betume numa mistura é de especial relevância para tornar uma obra mais económica.

Numa segunda fase, temos todas as razões para tornar os materiais que aplicamos nas nossas estradas mais duráveis, mais resistentes ao clima e mais resistentes às ações do tráfego, de modo a que haja o mínimo de intervenções, menos manutenção, o que se traduz em maior economia.

Para além da percentagem ótima em betume, o presente documento irá debruçar-se, durante a fase de formulação, sobre as características funcionais e estruturais dos pavimentos e sobre a sua importância no estudo inicial.

1.2. Objetivos

Pretende-se constituir uma síntese para o conhecimento de tipos de formulações de misturas betuminosas usadas em Portugal e servir de base a uma discussão que abranja novos métodos de estudo. Em última análise pretende-se concluir que o aumento de ensaios durante a fase de estudo poderá contribuir para o aumento da longevidade das misturas e para uma maior economia em serviço, diminuindo a necessidade de intervenções.

Uma mistura deverá apresentar as seguintes características: ser fácil de fabricar e de colocar em obra; suportar os efeitos das cargas e das ações climáticas ao longo do tempo que estiver em serviço no pavimento; ter uma percentagem de vazios que, simultaneamente, lhe permita evitar a exsudação do betume e a sobrecompactação posterior à sua entrada em serviço; apresentar uma quantidade de ligante que assegure a coesão e a durabilidade do pavimento (Pimentel, 2013).

Assim, as misturas colocadas nas camadas dos pavimentos podem diferir no tipo de agregado e na sua granulometria, no tipo e quantidade de ligante, na utilização de aditivos ou agentes que modificam o betume, e na sua composição volumétrica. Com o desenvolvimento de novos métodos procura-se entender como é que a formulação influencia as propriedades mecânicas das misturas e o desempenho mecânico e funcional dos pavimentos que resultam da sua aplicação (Pimentel, 2013).

Para melhor a contextualização dos assuntos foram elaboradas sínteses onde se introduzem os tipos de formulação existentes (capítulo 3) e os ensaios usados nas abordagens empírica e fundamental (capítulo 4).

1.3. Estrutura do trabalho

A presente dissertação foi dividida em 7 capítulos que descrevem aspetos fundamentais para a compreensão e desenvolvimentos dos objetivos apresentados.

No capítulo 1 faz-se um enquadramento do tema e são apresentados os principais objetivos desta dissertação.

No Capítulo 2 faz-se uma revisão dos conhecimentos existentes sobre os pavimentos rodoviários flexíveis, tipos e sua estrutura típica. Abordam-se as características dos materiais presentes nas misturas betuminosas e o seu comportamento.

No Capítulo 3 apresentam-se os principais tipos de formulação reconhecidos internacionalmente. A nível nacional faz se a comparação entre o que é solicitado nos estudos

de formulação da IP e da BRISA. Abordam-se as vantagens e desvantagens do método mais usado em Portugal, o método Marshall.

No capítulo 4, abordam-se muito resumidamente os ensaios que compõem um estudo de formulação a nível nacional e também um ensaio usado em França para os estudos de formulação.

No capítulo 5 faz-se a comparação sistemática dos fusos granulométricos da IP e da Brisa, tendo por base a camada respeitante a cada fuso.

No capítulo 6 faz-se a análise detalhada à abordagem empírica e fundamental preconizada pela norma de produto de betão betuminoso, NP EN 13108-1. De modo a ter uma base para a crítica, neste capítulo também é feita a descrição do método de formulação usado em França.

No capítulo 7 estão apresentadas as conclusões gerais do trabalho desenvolvido.

2. Pavimentos Rodoviários Flexíveis

2.1 Definição

Um pavimento é a “parte da estrada, rua, ou pista, que suporta diretamente o tráfego e transmite as respectivas solicitações à infraestrutura (LNEC, 1962). A principal função de um pavimento é oferecer uma superfície de rolamento livre e desempenhada, destinada a permitir a circulação de veículos em adequadas condições de segurança, conforto e economia.

Um pavimento rodoviário flexível é um pavimento cujas camadas superiores são constituídas essencialmente por misturas betuminosas. Uma mistura betuminosa, como o nome indica, é uma mistura constituída por agregados e betume, em que o betume é usado como agente de ligação entre as partículas de agregados.

Um pavimento rodoviário flexível é considerado como um sistema multiestratificado, formado por várias camadas de espessura finita, apoiada na fundação constituída pelo terreno natural, (Picado Santos, et al., 2006). As camadas superiores são constituídas por misturas betuminosas de diferentes espessuras e com diferentes características, seguindo-se camadas de agregado com características muito específicas, terminado pela fundação do pavimento, geralmente constituída pelo solo de fundação e pelo leito do pavimento. Como exemplo pode-se observar a Figura 2.1, que representa um pavimento rodoviário flexível típico.

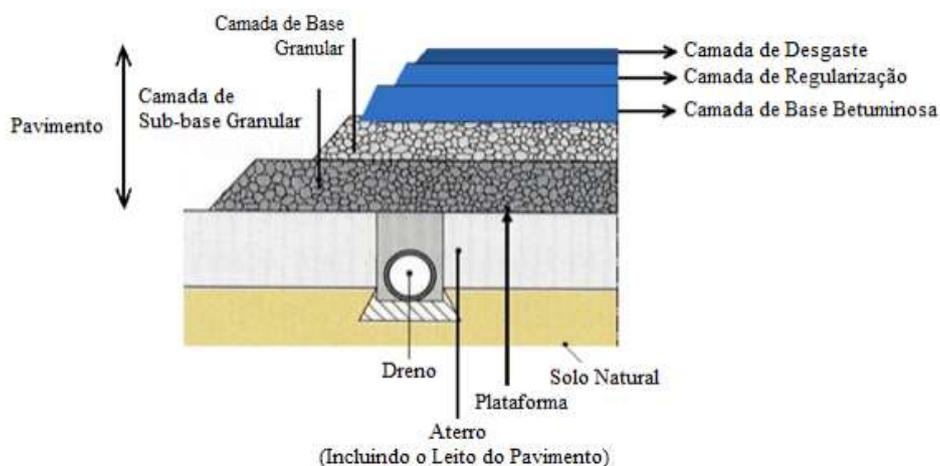


Figura 2.1-Diagrama esquemático da estrutura de um pavimento rodoviário (Inlr, 2016)

A um pavimento devem exigir-se dois tipos de qualidade: a qualidade funcional e a qualidade estrutural. A primeira está relacionada com as exigências dos utentes: conforto e segurança da circulação. A segunda está relacionada com a capacidade do pavimento para suportar as cargas dos veículos sem sofrer alterações para além dos valores limite, as quais colocariam em causa a garantia da qualidade funcional, aquela que é captada pelos utentes rodoviários (Picado Santos, et al., 2006).

O comportamento de um pavimento rodoviário é determinado pelas ações que atuam sobre ele (resultantes da aplicação de cargas dos veículos e resultantes dos agentes climáticos), pela sua constituição, ou seja, pelo número e espessura das camadas, pelas características dos materiais e finalmente pelas características da fundação (Picado Santos, et al., 2006). São apresentadas na tabela 2.1, as funções das camadas constituintes de um pavimento flexível.

Tabela 2.1- Função das camadas e da fundação de um pavimento rodoviário (Inlr, 2016)

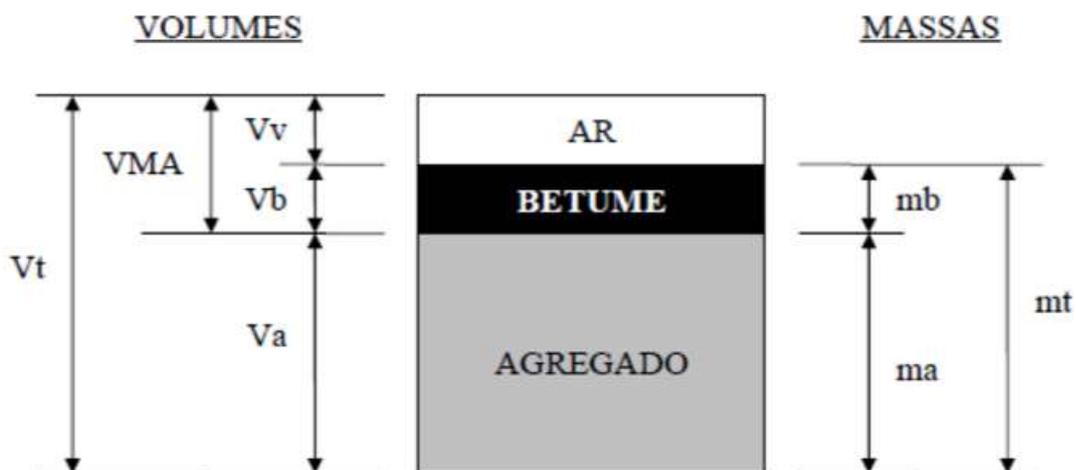
| CAMADAS DO PAVIMENTO | | FUNÇÃO |
|----------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Camadas Superiores | Desgaste | - Adequada circulação do tráfego com conforto e segurança; -Drenagem ou impermeabilização; -Distribuições das tensões induzidas pelo tráfego. |
| | Regularização | -Camada estrutural; - Regularizar a camada da superfície da camada de base. |
| | Base Betuminosa | -Camada estrutural; |
| Camadas Granulares | Base | -Camada estrutural; -Degradações induzidas pelo tráfego. |
| | Sub Base | -Proteger durante a fase construtiva as camadas inferiores; -Proteger a base da subida da água capilar; -Drenagem interna do pavimento; -Camada estrutural; -Resistência à erosão |
| Solo de fundação | Leito do pavimento | -Evitar a deformação do solo; -Homogeneidade das características mecânicas da fundação -Plataforma construtiva; -Possibilidade de compactação das camadas subjacentes em adequadas condições. |
| | Terreno de fundação | - Suporte do pavimento; - São as suas características que condicionam o dimensionamento. |

2.2 Características gerais das misturas betuminosas

Pimentel (2013), as misturas betuminosas são uma mistura de ligante e de uma mistura de agregados, fabricadas de modo a que todas as partículas de agregados sejam revestidas por uma película de ligante. O seu processo de fabrico implica o aquecimento do ligante e dos agregados, a sua mistura e aplicação em obra, sendo realizada a temperaturas significativamente superiores à temperatura ambiente. Conforme a camada onde irá ser colocada e a sua função nesta camada, as misturas betuminosas apresentam vários tipos de composições granulométricas e diferentes percentagens em betume.

As misturas betuminosas são constituídas por agregados (cerca de 95% em massa), betume (cerca de 5% em massa) e ar, cujas propriedades dependem das proporções relativas destes componentes, assim como das características intrínsecas do betume e dos agregados. As composições volumétricas das misturas betuminosas são ilustradas na Figura 2.2. e no capítulo 4 são apresentadas as equações relativas a estas características.

Figura 2.2 - Composição Volumétrica das misturas betuminosas (Murtinheira, 2011)



Em Portugal, o termo mistura betuminosa a quente aplica-se a grande parte das misturas betuminosas utilizadas em obras de pavimentação, desde as argamassas betuminosas, fabricadas apenas com agregados finos, fíler e betume, até aos macadames betuminosos, nos quais os agregados grossos têm um papel preponderante no comportamento da mistura (Cepsa, 2007).

As designações das misturas betuminosas em Portugal sofreram alterações, de modo a irem de encontro com as designações europeias e assim facilitar o entendimento comum entre os vários Estados-Membros. De acordo com o Instituto Português da Qualidade (IPQ), devem ser mantidas as abreviaturas constantes da versão inglesa da EN13108-1 e recomenda-se que sejam adicionadas siglas correspondentes ao tipo de mistura em causa. Inclui-se o seguinte exemplo para a designação do macadame betuminoso, fuso A, a aplicar em camada de base, produzida com um betume de gama de penetração 50/70 e com um agregado cuja abertura do peneiro superior é igual a 20 mm: “AC20 base 50/70 (MB)”, sendo que as siglas MB são as iniciais da designação da mistura em Português (Macadame Betuminoso).

Tabela 2.2 Novas Nomenclaturas das misturas betuminosas (NP EN 13108-1)

| Camada | Designação Anterior | Designação atual |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------|
| Base | Macadame Betuminoso Fuso B | AC 32 base ligante (MB) |
| | Macadame Betuminoso Fuso A | AC 20 base ligante (MB) |
| | Mistura betuminosa de Alto Módulo | AC 20 base ligante (MBAM) |
| Ligação | Macadame Betuminoso Fuso A | AC 20 bin ligante (MB) |
| | Mistura betuminosa Densa | AC 20 bin ligante (MBD) |
| | Mistura betuminosa de Alto Módulo | AC 16 bin ligante (MBAM) |
| | Betão Betuminoso | AC 14 bin ligante (BB) |
| | Argamassa betuminosa com betume modificado | AC 4 bin ligante (AB) |
| Regularização | Macadame Betuminoso Fuso A | AC 20 reg ligante (MB) |
| | Mistura betuminosa Densa | AC 20 reg ligante (MBD) |
| | Betão Betuminoso | AC 14 reg ligante (BB) |
| | Argamassa betuminosa com betume modificado | AC 4 reg ligante (AB) |
| Desgaste | Betão Betuminoso | AC 14 surf ligante (BB) |
| | Betão Betuminoso Rugoso | AC 14 surf ligante (BBr) |
| | (micro) Betão Betuminoso Rugoso | AC 10 surf ligante (mBBr) |
| Nota explicativa das abreviaturas: | | |
| AC- designação do produto, cujo termo em inglês é “Asphalt Concrete”; | | |
| ligante – classe a definir; | | |
| base – referente à camada de base, cujo termo em inglês é similar “base course”; | | |
| bin – referente à camada de ligação, cujo termo em inglês é similar “binder course”; | | |
| reg – referente à camada de regularização, cujo termo em inglês é similar “regulating course”, de espessura variável; | | |
| surf – referente à camada de desgaste, cujo termo em inglês é similar “surface course”. | | |

O atual normativo Europeu inclui um conjunto de Normas Europeias que definem requisitos para as misturas betuminosas fabricadas a quente – oito (8) partes da série 13108, cujas propriedades são caracterizadas pelos respetivos métodos de ensaio descritos na série EN12697 – quarenta e oito (48) partes editadas e cinco (5) partes editadas em pré norma (IPQ).

2.3 Constituintes das misturas betuminosas

Os componentes sólidos de uma mistura betuminosa do tipo Betão Betuminosos são os agregados e o betume, aos quais poderão ser adicionado aditivos para melhoramento das suas características, tais como como fibras, borracha, polímeros ou outros constituintes. Devem ser utilizados apenas materiais constituintes com conformidade comprovada (NP EN 13108-1).

2.3.1 Agregados

O agregado é o material granular utilizado na construção que pode ser natural, artificial ou reciclado. O agregado natural tem origem mineral, o agregado artificial é resultante de um processamento industrial e o agregado reciclado decorre de materiais usados na construção e sofreram um processo de reutilização (Estradas de Portugal, 2014).

Os agregados correspondem a cerca de 80% do volume global das misturas betuminosas. Estes formam um esqueleto pétreo, que deve ter a capacidade de resistir à ação do tráfego.

Os agregados naturais devem apresentar-se homogéneos e não devem conter matéria orgânica ou quaisquer substâncias estranhas. Devem ser pouco suscetíveis à meteorização e apresentarem-se são ou pouco alterados (de acordo com os critérios propostos pela Sociedade Internacional de Mecânica das Rochas ISRM).

Embora os agregados naturais sejam os mais frequentemente usados nas misturas betuminosas em Portugal, estamos a ver um aumento progressivo da introdução de fresado (mistura betuminosa que foi retirada do pavimento em serviço por já não possuir as características necessárias ao bom desempenho do pavimento) incorporado nas misturas betuminosas novas. De acordo com a especificação do LNEC E 472 "Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central" podemos introduzir até um máximo de 50% de fresado em misturas betuminosas da camada de base e regularização e um máximo de 10%

na camada de desgaste. Ressalva-se que o fresado não entra na composição da mistura de agregados a 100% como agregado, uma vez que parte do fresado é betume.



Figura 2.3- Agregado Natural, Origem Granítica (LGMC, 2016)



Figura 2.4- Agregado Artificial, ASIC- Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (Oliveira, 2016)



Figura 2.5 - Agregado Reciclado, agregado obtido após fresagem de camada de mistura betuminosa (Antunes, 2016)

Os agregados usados nas misturas betuminosas têm uma norma de produto específica, a NP EN 13043. Cada caderno de encargos (CE) define as características mínimas que os agregados devem possuir para serem usados em determinada mistura betuminosa consoante a camada a que se destina. As especificações aplicáveis impõem requisitos mínimos no que respeita as diversas propriedades, tais como a granulometria, a limpeza, a resistência

mecânica ao desgaste e ao polimento, a forma e a afinidade ao betume. Ressalte-se que os agregados para misturas betuminosas estão obrigatoriamente sujeitos à Marcação CE.

2.3.2 Fíler

A designação fíler é atribuída a todo o agregado cuja maior parte (70% a 100%) passa no peneiro de 0,063 mm e que pode ser adicionado aos materiais de construção para lhe conferir certas propriedades.

O fíler pode resultar do processo de fabrico da mistura betuminosa, por recuperação dos finos por meio de sistemas adequados – fíler recuperado – ou ser produzido em separado numa instalação industrial segundo um processo controlado – fíler comercial. Os dois tipos de fíleres deverão ser de origem mineral. O fíler recuperado pode ser de qualquer natureza petrográfica, pois dependerá da natureza petrográfica do agregado utilizado para o fabrico da mistura betuminosa.

O fíler deve estar conforme a NP EN 13043 conforme o referido na NP EN 13108-1. O fíler usado nas misturas betuminosas, seja comercial ou recuperado, deverá ter Marcação CE.

2.3.3 Composição da mistura de agregados

A composição da mistura de agregados é uma combinação que se faz entre diferentes tipos de agregados (britas de vários tamanhos, fíler) de modo a compor um conjunto que possibilite o cumprimento do caderno de encargos em vigor.

A composição da mistura de agregado pode ser continua ou descontinua consoante o imbricamento necessário a dar à mistura em causa. No caso de ser contínua o que irá acontecer é que os agregados conseguem arranjar-se no espaço de modo a que a sua porosidade seja muito pequena. Pelo lado contrário, em composições descontínuas os agregados irão ser muito semelhantes entre si e que não irão conseguir colmatar os espaços vazios existentes. Deste modo teremos um aumento de porosidade.

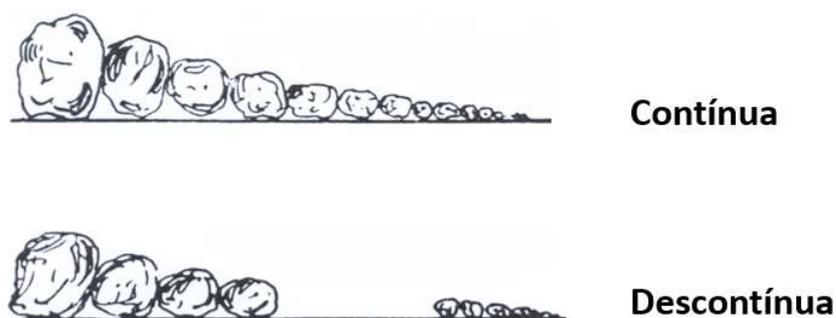


Figura 2.6- Curva contínua e curva descontínua (LGMC, 2016)

Em misturas betuminosas fechadas é necessário que esta composição seja contínua, de modo a que haja um equilíbrio entre agregados de maior e menor dimensão. Nas misturas betuminosas fechadas por vezes é necessário introduzir fíler, de modo a que a mistura fique com um acabamento “liso”.

Nas misturas betuminosas abertas, drenantes, a composição da mistura de agregados necessita de ser descontínua, de modo a proporcionar um aumento da sua porosidade.

Os agregados são inicialmente selecionados pela granulometria em função da eventualidade de poderem associar-se ou não na composição da mistura de agregados e posteriormente avaliados pelas suas características físicas e mecânicas, de modo a verificar se podem ser utilizados considerando as especificações vigentes.

A composição dos agregados deve ser expressa em percentagens da massa total da mistura de agregados. As percentagens de ligante e aditivo devem ser expressas em percentagens da massa total da mistura betuminosa. Em Portugal foi definido o uso da serie base + série 2 para a misturas betuminosas, de acordo com a NP EN 13108-1 e AN.

2.3.4 Ligante

“Ligante Betuminoso” é um material adesivo contendo betume que pode estar sob a forma de não modificado, modificado ou emulsionado. Betume é um material praticamente não volátil, adesivo e impermeável à água, derivado do petróleo bruto que é completamente ou quase todo solúvel em tolueno, muito viscoso e quase sólido à temperatura ambiente (Estradas de Portugal, 2014).

Existem diversos tipos de ligantes que podem ser utilizados na composição das misturas betuminosas. Contudo geralmente são utilizados os betumes asfálticos provenientes da refinação do crude.

Um betume deverá estar suficientemente fluído para envolver o agregado, num tempo considerado mínimo para obtenção de uma mistura homogénea; suficientemente viscoso para que não ocorram fenómenos de drenagem durante a mistura, armazenamento e transporte; suficientemente fluído para que a mistura permaneça trabalhável durante a compactação; suficientemente viscoso para suportar a circulação do equipamento de compactação (Pimentel, 2013).

3. Formulação de misturas betuminosas

Com o agravamento do tráfego nas últimas décadas em número e tipo (aumento da quantidade de veículos pesados- aumento por carga e eixos padrão), houve necessidade de aumentar as exigências do pavimento, quer a nível estrutural quer a nível das misturas betuminosas.

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 ótimo em serviço, de acordo com o tráfego, as condições climáticas e estruturais a que o pavimento está sujeito.

3.1 Tipos de formulações

Podem classificar-se os principais métodos existentes de formulação de misturas betuminosas em (adaptado de (Francken, 1998)) (Picado Santos, et al., 2006):

- Definição por especificação (métodos receita);
- Empíricos;
- Analíticos;
- Volumétricos;
- Racionais (Relacionados com o comportamento das misturas betuminosas e Baseados no comportamento das misturas betuminosas).

Foram considerados nove critérios para classificar as diferentes categorias de métodos de formulação (adaptado de (Francken, 1998)):

Tabela 3.1 Categorias de Métodos de formulação e respetivos critérios (adaptado de (Francken, 1998))

| Categorias de métodos de formulação | Critérios em que se baseia a formulação | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|------------------------|----------------------------------|------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------------------|
| | Baseados 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 ensaios empíricos | Utilização de ensaios de simulação | Utilização de ensaios fundamentais | Modelo de previsão do comportamento no pavimento |
| 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 |

De seguida são apresentados resumidamente os métodos de formulação acima mencionados.

3.1.1 Definição por especificação (métodos receita)

Este método é usado quando existe muita experiência da sua utilização. São utilizados para misturas betuminosas tradicionais, não permitindo qualquer uso de materiais que não sejam definidos na especificação. Neste tipo de método são definidos a curva granulométrica de agregados, a classe de penetração do betume a usar e a composição final da mistura betuminosa. Define a espessura da camada a colocar e as características que a mistura deve apresentar durante o espalhamento e compactação. Não se realiza nenhum ensaio

laboratorial. Os países que utilizam este tipo de método (e.g.: Reino Unido) fazem-no apenas para materiais e composições que provaram ter bom comportamento em serviço (Capitão, 2003).

As principais vantagens do uso dos métodos receita são, de acordo com (Capitão, 2003):

- As misturas apresentarem, em geral, um bom desempenho em serviço;
- As receitas pré-estabelecidas são simples e aplicáveis quaisquer tipos de misturas para as quais foi estabelecida uma especificação;
- É relativamente simples verificar se as matérias-primas e as misturas cumprem as especificações.

As principais desvantagens do uso dos métodos receita são, de acordo com (Capitão, 2003):

- As receitas são estabelecidas para condições particulares de solicitação de tráfego e de condições climáticas, as quais podem não se verificar nos locais onde são aplicadas as misturas;
- As receitas podem não permitir utilizar agregados eventualmente disponíveis localmente por estes não terem as características pré-estabelecidas, o que acarreta um aumento dos custos das misturas;
- A utilização de agregados de origens diferentes, ainda que respeitando os requisitos das receitas, podem conduzir a misturas com características mecânicas bastante diferentes e, conseqüentemente, com desempenhos no pavimento diferentes do esperado.

3.1.2 Métodos de formulação empíricos

Os métodos empíricos derivam dos métodos por receita. No entanto, já abrangem alguns ensaios laboratoriais mecânicos simples e económicos. Pretende-se determinar a quantidade de betume a usar e deste modo controlar variáveis como a porosidade e estabilidade da mistura, cumprindo no entanto com os limites estabelecidos por experiência antecedente.

Este método não permite determinar as propriedades intrínsecas das misturas, apenas grandezas mecânicas, as quais não se relacionam de forma direta com o desempenho em obra. Como exemplo, não é possível determinar a resistência à fadiga através da estabilidade (capacidade para resistir às deformações permanentes produzidas pelas cargas, em determinadas condições de aplicação) obtida num ensaio empírico.

Uma nova fase de desenvolvimento dos métodos empíricos decorreu com o desenvolvimento de métodos de formulação como o Marshall, sendo este um dos métodos de formulação mais conhecido e utilizado atualmente a nível mundial e em Portugal. O método Marshall deve o nome a Bruce Marshall do Mississippi State Highway Department, responsável pela invenção do ensaio Marshall na década de 30 do século XX. (Pimentel, 2013)

O método Marshall, tal como o nome baseia-se na utilização dos resultados do ensaio Marshall o qual foi posteriormente aperfeiçoado e adotado pela U.S. Army Corps of Engineers em 1943, para formulação e controlo do fabrico em obra, tendo sido posteriormente acrescentados critérios para dosagem (Pimentel, 2013).

Estes métodos têm como inconveniente o facto de serem impróprios e desajustados para as inovações tecnológicas que têm surgido e aos novos materiais de pavimentação.

As principais vantagens do uso dos métodos receita são, de acordo com (Capitão, 2003):

- O método utiliza técnicas de ensaio simples e relativamente baratas;
- Há grande experiência da sua utilização no mundo inteiro;
- Existem muitos resultados e informação disponíveis que podem servir de base ao estabelecimento de critérios de qualidade para as misturas, para uma ampla gama de utilizações.

As principais desvantagens do uso dos métodos receita são, de acordo com (Capitão, 2003):

- O método inclui a realização de ensaios empíricos e, por isso, não se baseia nas propriedades fundamentais das misturas;
- O método de compactação dos provetes fabricados para a realização de ensaios mecânicos não simula bem as condições de compactação que ocorrem no pavimento.

O método Marshall será descrito com detalhe no capítulo 3.2.

3.1.3 Métodos de formulação analíticos

Estes métodos consistem no cálculo da composição volumétrica de misturas betuminosas, nomeadamente a proporção de cada uma das frações de agregados usados e os volumes de betume e de vazios. Estes métodos não incluem o fabrico de quaisquer provetes, pelo que a composição a que se chega é de origem completamente analítica (Capitão, 2003).

Aconselha-se, no entanto, a execução de um ensaio para verificação experimental antes de essa composição ser aceite como resultado final. A comparação feita entre resultados decorrentes deste método e ensaios in situ, revelou que este método de formulação utiliza fórmulas analíticas bastante adaptadas à realidade.

Os métodos analíticos não têm por objetivo a obtenção de uma percentagem ótima de betume, antes visam determinar uma composição que assegure a melhor relação entre a resistência ao fendilhamento por fadiga e a resistência à deformação permanente, o que não corresponde necessariamente à formulação de uma mistura betuminosa com um desempenho adequado em obra (Capitão, 2003).

As principais vantagens do uso dos métodos receita são, de acordo com (Capitão, 2003):

- Quando se dispõe de correlações entre as composições volumétricas obtidas analiticamente e as propriedades que é possível medir em ensaios mecânicos, permitem acelerar o processo de formulação de misturas betuminosas, porquanto se pode reduzir a quantidade de estudos laboratoriais sobre composições preliminares;
- Possibilitam a deteção mais rápida das causas de insucessos na formulação de misturas betuminosas, nomeadamente quando, ao realizar ensaios mecânicos de verificação, não são cumpridas as exigências estabelecidas com base em correlações entre os resultados dos ensaios e o método analítico utilizado.

Como desvantagens (Capitão, 2003) pode-se apontar que estes métodos só por si, não asseguram um bom desempenho das misturas betuminosas, sendo, em geral, complementados com algum tipo de ensaios mecânicos de modo a verificar a qualidade da composição a que se chegou.

3.1.4 Métodos de formulação volumétricos

Estes métodos são assim designados porque a percentagem de betume e granulometria a usar são obtidos através da análise dos volumes parcelares que compõe as misturas (vazios, betume e agregados). Aqueles volumes são medidos sobre provetes produzidos em laboratório de modo a reproduzirem, tão fielmente quanto possível, as condições de compactação usadas in situ. Nestes métodos, a seleção da curva granulométrica e da percentagem ótima em betume a usar é feita pela verificação da maior ou menor correspondência entre formulações testadas e certos requisitos da compatibilidade pré definidos, entendendo-se estes como uma medida da aptidão da mistura a ser compactada. (Capitão, et al., 2001)

Tal como os analíticos, os métodos volumétricos são, só por si, insuficientes, havendo necessidade de realizar ensaios mecânicos adicionais para verificar as composições resultantes dos cálculos. Dado o grande número de variáveis envolvidas, é ilusório pensar que é possível obter, com elevada confiança misturas com bom comportamento mecânico recorrendo apenas a métodos volumétricos.

Um exemplo, o SHRP-Superpave pode ser classificado na família de métodos volumétricos (Capitão, et al., 2001). Este método obtém a percentagem ótima em betume através das propriedades volumétricas dos provetes compactados no compactador giratório. O controlo de energia de compactação é realizado pelo número de rotações.

Os métodos de formulação volumétricos devem ser utilizados apenas em estradas com tráfego pouco intenso. Neste 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 (Silva, 2006).

Os métodos volumétricos estão na base dos mais recentes métodos de formulação relacionados com o comportamento ou baseados no comportamento das misturas betuminosas (Silva, 2006).

3.1.5 Métodos de formulação relacionados com o desempenho

Estes métodos apontam o desempenho de uma mistura betuminosa previamente estudada por outros métodos como ponto de partida para a definição da composição volumétrica ou ponderal dos seus constituintes.

Estes métodos consistem no fabrico de provetes de misturas betuminosas que cumprem certos critérios estabelecidos de composição volumétrica, sendo posteriormente sujeitos a ensaios mecânicos de modo a avaliar as propriedades das misturas, relacionadas com o comportamento mecânico do pavimento. As composições finais das misturas são finalmente ajustadas com base nos resultados dos ensaios mecânicos realizados. Estes ensaios procuram reproduzir em laboratório, tanto quanto possível, as condições a que a mistura betuminosa será sujeita quando aplicada, nomeadamente o nível de tensão e a temperatura, quer durante os trabalhos de fabrico e aplicação das misturas, por exemplo, o ensaio na Prensa Giratória de Corte, quer após a entrada em serviço, ao longo da vida do pavimento por exemplo, o ensaio com simulador de tráfego (Pimentel, 2013).

3.1.6 Métodos de formulação baseados no desempenho

Partindo de misturas cujas composições foram obtidas por quaisquer dos métodos acima mencionados, sujeita-se a mistura a ensaios que traduzem o seu comportamento em serviço, os quais permitem medir as suas propriedades fundamentais. Estas propriedades irão ser usadas como dados de entrada em modelos de previsão do comportamento dos pavimentos, os quais irão fixar a percentagem ótima de betume. Os modelos têm em consideração as ações climáticas, propriedades dos materiais, de degradação dos materiais e sua evolução, função do tipo de estrutura e ações que irão solicitar o pavimento, permitindo estimar a evolução da degradação no pavimento.

Pimentel (2013), contudo, a complexidade da investigação do comportamento global de um pavimento ou considerando individualmente as suas camadas constituintes, quando solicitadas pelas ações tornam este método difícil de ser implementado, quer pelos modelos quer pelo ensaios laboratoriais necessários.

3.2 Comparação entre o método de formulação usado pelo Anexo Nacional, IP e BRISA

Em Portugal, os estudos de formulações de misturas betuminosas fechadas a quente são maioritariamente realizadas por um método empírico – o Método Marshall. Este método encontra-se descrito no AN, sendo o método recomendado nas formulações de misturas betuminosas fechadas a quente.

A EP usa normas de ensaio europeias e a BRISA usa normas ASTM, NP e AAHTO. Embora equivalentes, algumas das normas são consideravelmente diferentes, tomando por exemplo a NP 142 e EN 12697-34 ambas para a o ensaio Marshall. Na primeira são produzidos 3 provetes de ensaio e após a sua medição são levados à rotura. A força máxima daí resultante e a sua deformação são o resultado final deste método de ensaio (média dos 3 provetes). O ensaio Marshall através da norma EN 12697-34, descrito no capítulo 4.3, obriga ao fabrico de 4 provetes e após a sua medição e cálculo da baridade os provetes são levados à rotura. Este método de ensaio obriga a cálculos adicionais de modo a encontrar a deformação total, deformação tangencial e deformação dos provetes. À força máxima é também aplicado um fator de correção associado à altura dos provetes. De seguida irá descrever-se o método Marshall com detalhe.

O método Marshall aplica-se a misturas betuminosas utilizadas em qualquer tipo de camada, cuja dimensão nominal dos agregados com menos que 15% em massa retida no peneiro de 22,4 mm e nenhuma no peneiro de 31,5 mm¹. É necessário produzir 4² provetes, para cada percentagem em betume estudada. São fabricadas misturas betuminosas considerando 5 percentagens de betume (com incrementos de 0,5 %). O valor inicial sobre o qual se adiciona os incrementos será o valor mínimo exigido pelo CE para aquela mistura.

Sobre os provetes compactados são determinadas as suas baridades, de acordo com capítulo 4.5, e são determinadas as características relacionadas com os vazios de acordo com o 4.8. Os provetes serão depois submetidos ao ensaio Marshall conforme descrito em 4.3.

Para as propriedades determinadas sobre os provetes compactados são determinados os valores médios para cada percentagem de betume dos 4 provetes compactados e são, em gráficos, traçadas as curvas que relacionam a percentagem de betume com cada uma destas propriedades (baridade, porosidade, estabilidade Marshall e deformação Marshall).

¹ De acordo a EN 12697-30:2012.

² O Anexo Nacional refere o uso de apenas 3 provetes para o Ensaio Marshall. No entanto a norma de ensaio EN 12697-34 exige o fabrico de 4 provetes por ensaio. Deste modo, devem ser produzidos 4 provetes por ensaio.

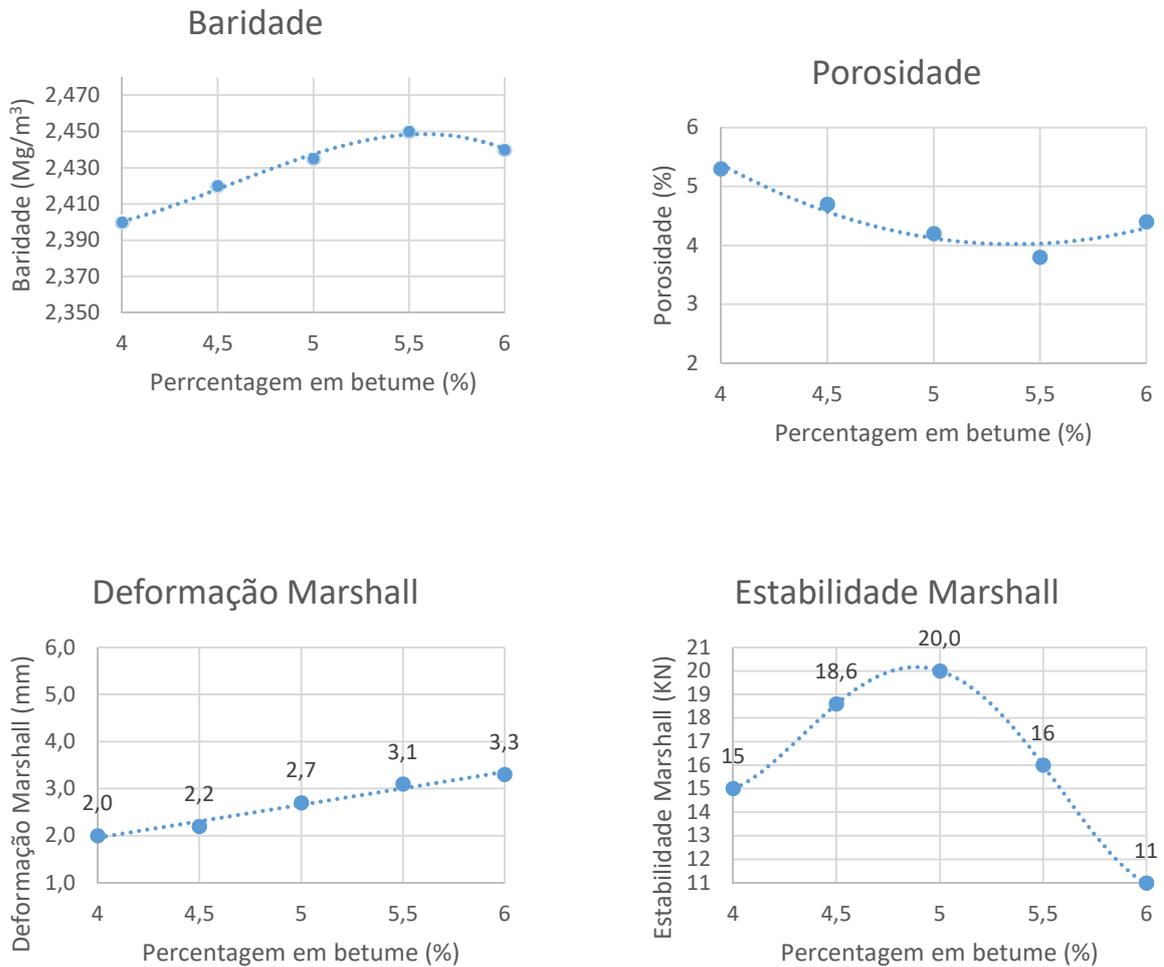


Figura 3.1- Formulação pelo método Marshall: representação gráfica da variação das características de uma mistura betuminosa com a percentagem em betume (LGMC, 2016)

A percentagem “ótima” de betume será a que resulta da média dos valores das percentagens de betume que conduzem ao valor máximo da baridade da mistura betuminosa compactada, ao valor médio dos limites da porosidade, ao valor máximo correspondente à estabilidade Marshall e ao valor médio dos limites da deformação Marshall (os valores médios correspondem ao ponto médio do intervalo de valores exigido no CE em vigor, para cada mistura em particular).

O método Marshall, apesar de ser muito utilizado, apresenta algumas vantagens e inconvenientes (Picado Santos, 2013) que o caracterizam e que designadamente são:

VANTAGENS:

- Método que, pelo seu longo historial de aplicação, induz uma experiência muito significativa na sua aplicação, permitindo uma previsão do comportamento;
- Utilização de equipamentos de relativo baixo custo;
- Técnicas de ensaio simples e fáceis de executar;
- Existem muitos resultados e informação disponíveis que podem servir de base ao estabelecimento de critérios de qualidade para as misturas, para uma ampla gama de utilizações;

INCONVENIENTES:

- O método inclui a realização de ensaios empíricos e, por isso, não se baseia nas propriedades fundamentais de desempenho das misturas;
- O processo de compactação em obra não é adequadamente representado pelo método Marshall, não simulando o comportamento dos materiais nem dando representatividade aos provetes moldados;
- Limitação da dimensão máxima do agregado a utilizar no fabrico dos provetes de misturas betuminosas a quente;
- Ausência de parâmetros de controlo da qualidade em obra relacionadas com o estudo laboratorial efetuado;
- Dificuldade no controlo da temperatura no fabrico dos provetes devido à reduzida dimensão do provete;
- Fraca representatividade dos provetes moldados;
- Como não se baseia nas propriedades de desempenho das misturas betuminosas, torna-se desadequado perante novas exigências e em novos materiais a aplicar em pavimentos rodoviários;

O AN e por consequência a EP, aconselha a um estudo adicional em que, após o estudo inicial anterior, sejam realizados ensaios de pista e de sensibilidade à água sobre três misturas betuminosas: uma com a percentagem de betume “ótima“ determinada pelo método Marshall, uma com a percentagem de betume igual ao valor ótimo -0,5 % e outra com uma percentagem de betume igual ao valor ótimo + 0,5 %. Ambos os documentos recomendam a determinação do índice de Resistência conservada (IRC).

A EP acresce que ainda poderão ser exigidos outros ensaios de caracterização mecânica das misturas (módulos de deformabilidade, resistência à fadiga, etc.).

A Brisa também define o método de estudo de formulação de misturas betuminosas a quente, em que o método é o Método Marshall (neste caso apenas se produz 3 provetes Marshall por cada percentagem em betume), variando nas normas de ensaio e na introdução de um ensaio de efeito de água sobre as misturas, neste caso obrigatório.

A BRISA, exige que o estudo de formulação seja realizado pelo método Marshall mas não identifica a norma de ensaio (BRISA, 2013). De seguida realiza-se o ensaio “Efeito da água na coesão de misturas betuminosas compactadas”, pela AAHTO T 165-74, sobre provetes tipo Marshall. Finalmente é realizado o ensaio de estabilidade, que é idêntico ao ensaio de Índice de resistência conservada (descrito no capítulo 4.9 desta tese) exigido também pela IP.

A BRISA ainda solicita ao empreiteiro para camadas de desgaste: “Ensaio de pista” segundo a Norma NLT-173/84 para as camadas de Base o Módulo de Deformabilidade Dinâmico a 20° C, NLT-349/90 e determinação dos parâmetros da lei de Alto Módulo de Rigidez para uma temperatura de 20 °C e uma frequência de 10 Hz, de acordo com a Norma AASHTO TP 8-94.

3.3 Considerações Finais

Em cada categoria de métodos de formulação podem apontar-se vantagens e desvantagens, devendo a sua escolha ter em conta diversos fatores, tais como: a importância da obra, a experiência da equipa de formulação da mistura, os equipamentos disponíveis e o quadro de normalização existente. Deve procurar-se a utilização de um método de formulação que permita obter um bom equilíbrio entre o esforço envolvido e o risco de insucesso do material que pode aceitar-se para o pavimento a que se destina. Por exemplo, para pavimentos com tráfego pouco intenso as exigências são menores, logo poderá ser usado um método de formulação menos complexo e conseqüentemente mais económico. A formulação de misturas betuminosas resulta, assim, da natural necessidade de se tentar controlar e otimizar as proporções ponderais dos materiais constituintes de uma mistura betuminosa, de forma a garantir que a mesma apresenta características adequadas para a aplicação pretendida (Domingues Silva, 2014).

Em relação aos métodos de formulação usados nas duas concessionárias estudadas, pode se referir que a Brisa é consideravelmente mais exigente nos estudos e quantidade de ensaios das misturas betuminosas que impõe ao empreiteiro para as camadas de misturas betuminosas. Por exemplo impõe valores mínimos para o ensaio de resistência à fadiga nas situações em que este ensaio é exigido.

De momento, a EP não impõe limites para diversos ensaios, nomeadamente, o ensaio de pista e sensibilidade à água. Embora ambos os valores devam ser declarados, não há imposição quanto aos valores mínimos.

Em relação aos ensaios podemos concluir que é no valor obtido nas baridades dos provetes que se consegue identificar e prever alguma anomalias que poderão ser obtidas nos resultados do ensaio Marshall. Como já foi referido, após a compactação dos 4 provetes de ensaio, terá de ser realizada a baridade dos provetes compactados. Se a baridade dos provetes for muito diferente, podemos assumir uma grande disparidade entre estabilidade e deformação Marshall o qual poderá advir repetição do ensaio.

Pelo motivo acima descrito é recomendado que a produção de provetes seja fortemente supervisionado. Desde o tempo de aquecimento da mistura à colocação da mistura nos moldes, toda a produção envolvida tenha por finalidade, provetes de ensaio o mais semelhante possível entre si.

4. Ensaios usados na formulação de misturas betuminosas a quente

De seguida irão ser apresentados, de uma forma resumida, os ensaios usados para formulação e classificação das misturas betuminosas em Portugal, de acordo com o AN e consequentemente com a norma de produto NP EN 13108-1.

Embora a BRISA ainda use norma de ensaio de outras origens, estas não irão ser abordadas no presente estudo.

4.1 Fabrico de misturas em laboratório

Âmbito

A norma de ensaio EN 12697-35, descreve um método para a produção de misturas betuminosas em laboratório para o posterior fabrico de provetes compactados.

Método de ensaio

Após secagem até massa constante e posterior arrefecimento até temperatura ambiente, os agregados, fíler e aditivos (se usados) são pesados cumprindo com a composição da mistura. De seguida são aquecidos a uma temperatura alvo, que varia consoante o betume a introduzir na mistura betuminosa, durante um tempo mínimo de 8h. O betume é aquecido à temperatura alvo entre 3h a 5h.

Pré-aquecer o recipiente onde se irá efetuar a mistura. Verter os agregados e fíler para o recipiente e adicionar o betume. Misturar todos os componentes até se obter uma mistura homogénea.

4.2 Compactação de provetes em laboratório

Âmbito

A norma de ensaio EN 12697-30 descreve os métodos de moldagem de provetes de misturas betuminosas através de compactação por impacto. Aplica-se a misturas betuminosas (preparadas em laboratório ou resultantes da amostragem no local), com uma dimensão máxima de inertes inferiores ou igual a 22,4 mm, podendo exceder esta dimensão em 15% da massa total.

Método de ensaio

Aquece-se uma mistura betuminosa recém-misturada, ou recolhida no local, à temperatura alvo que é colocada num molde de compactação em aço. Em seguida, a mistura é compactada num compactador de impacto permitindo a queda da massa deslizante a partir de uma determinada altura com a aplicação de um determinado número de pancadas, dentro de um determinado intervalo de tempo, sobre o provete. De seguida o provete é arrefecido dentro do molde à temperatura ambiente até aos 40°C, valor a partir do qual pode ser desmoldado.

4.3 Ensaio Marshall

Âmbito

A norma de ensaio EN 12697-34 especifica um método de ensaio para determinação da estabilidade, da deformação e do quociente Marshall.

Método de ensaio

Devem ser moldados um mínimo de 4 provetes para o ensaio. Após desmoldagem esperar 4h antes de iniciar qualquer ensaio. Todos os ensaios devem ser concluídos 32h após desmoldagem. Calcular a baridade de todos os provetes de ensaio e medir as alturas e diâmetros.

Imergir os provetes num banho de água a $60 \pm 1^\circ\text{C}$ por um período de tempo superior a 40 min e inferior a 60 min. Remover o provete do banho de água e colocá-lo no estabilómetro tendo o cuidado de verificar se o provete se encontra centrado.

Aplicar carga no provete de modo a alcançar uma taxa constante de deformação de 50 ± 2 mm/min. Continuar a aplicação da carga até que a leitura máxima é obtida no dispositivo de medição de carga. Este procedimento deve decorrer num período máximo de 40 s após a remoção do provete do banho de água. Executar os ensaios de estabilidade e de deformação num grupo de quatro provetes. Realizar a avaliação dos provetes para a deformação tangencial, deformação, deformação total e estabilidade.

Cálculos

Cada um dos 4 provetes ensaiados obtém-se um valor para a deformação e outro para estabilidade (força de rotura do provete multiplicada por uma fator de correção).

Sobre a média dos 4 provetes para a estabilidade e sobre a média dos 4 provetes para a deformação obtém-se o quociente Marshall.

$$\text{Quociente Marshall} = \frac{\text{Estabilidade}}{\text{Deformação}} \text{ (kN/mm)} \quad (4.1)$$

4.4 Determinação da Baridade Máxima Teórica

Âmbito

A norma de ensaio EN 12697-5 especifica métodos de ensaio para determinar a baridade máxima teórica de uma mistura betuminosa solta com betumes de pavimentação, betumes modificados ou outros betumes usados em pavimentação. Os métodos de ensaio podem ser usados em misturas betuminosas frescas ou envelhecidas.

Método de ensaio

De seguida é apresentado o procedimento A, o mais corrente usado em Portugal

Preparação da amostra: Secar previamente a mistura a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ até massa constante. Desagregar convenientemente a mistura reduzindo a partículas individuais ou a aglomerados de partículas com tamanho máximo de 6 mm. Preparar um provete com pelo menos 50 vezes a maior dimensão do agregado, com um mínimo de massa de 250g.

Pesar o picnómetro vazio a 0,1g. Colocar o provete dentro do picnómetro e pesar a 0,1g. Colocar água até cerca de 30 mm abaixo da junta. Tapar e retirar o ar aplicando uma pressão de vácuo residual de 4 kPa ou menos por um período de 15 min. Ajudar a libertação do ar usando o agitador mecânico. Acabar de encher o picnómetro e garantir que não existe ar retido. Colocar em banho de água à temperatura pretendida ($\pm 1,0^\circ\text{C}$) por um período superior a 30 min e inferior a 180 min. Retirar o picnómetro do banho de água, limpar e pesar a 0,1g. Medir a temperatura da água imediatamente após pesagem a 0,1°C.

Cálculos

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{\left[(10^6 \times V_P) - \left(\frac{m_3 - m_2}{\rho_w} \right) \right]} \left(\frac{Mg}{m^3} \right) \quad (4.2)$$

Legenda:

m_1 – massa do picnómetro (g);

m_2 – massa do picnómetro com água (g);

m_3 – massa do picnómetro com água e amostra (g);

V_P – Volume do picnómetro (m^3);

ρ_w – massa volúmica da água à temperatura T (Mg/m^3);

4.5 Determinação da baridade de provetes compactados

Âmbito

A norma de ensaio EN 12697-6 define métodos para a determinação da massa volúmica de um provete betuminoso compactado. Descreve 4 métodos de ensaio, cuja aplicação varia consoante o tipo de mistura betuminosa a ensaiar. Os métodos de ensaio são aplicáveis à utilização de provetes compactados fabricados em laboratório ou de tarolos retirados do pavimento após colocação e compactação.

Os métodos de ensaio são os seguintes:

- Baridade - a seco (para provetes com superfície muito fechada);
- Baridade - provete saturado com a superfície seca, SSD, (para provetes com uma superfície fechada);
- Baridade - provete selado (para provetes com uma superfície aberta ou grosseira);
- Baridade - geométrico (para provetes com uma superfície regulares faces de formas geométricas, por exemplo, quadrados, retângulos, círculos, etc.)

De seguida irão ser descritos os métodos B e D, os mais correntes nos estudos de formulação em Portugal:

Método B: Baridade – provete saturado com a superfície seca (SSD)

Determinar a massa do provete seco (m_1). Determinar a temperatura da água de ensaio. Imergir o provete no banho de água a uma temperatura de ensaio conhecida. Deixar a água saturar o provete durante um período de tempo suficiente até a massa do provete não sofrer alteração (o período de saturação é de pelo menos 30 min mas não deverá ser superior a 3h). Determinar a massa do provete saturado quando imerso (m_2). Remover o provete da água e secar as gotas da superfície com uma camurça húmida. Determinar, através de pesagem ao ar, a massa do provete saturado com a superfície seca imediatamente após a secagem (m_3).

Cálculos

$$\rho_{bssd} = \frac{m_1}{m_3 - m_2} \times \rho_w \text{ (Mg/m}^3\text{)} \quad (4.3)$$

Legenda:

m_1 – massa do provete seco (g);

m_2 – massa do provete em água (g);

m_3 – massa do provete saturado com a superfície seca (g);

ρ_w – massa volúmica da água à temperatura T (Mg/m³);

Método D: Baridade geométrica

Determinar as dimensões do provete em milímetros. Realizar 4 medições igualmente espaçadas para a dimensão altura. Esta medição deve-se realizar aproximadamente a 10 mm (para dentro) do bordo do provete. No caso de provetes prismáticos usar a mesma metodologia para as dimensões comprimento e espessura. No caso de provetes cilíndricos, realizar 2 medições ao diâmetro perpendiculares entre si no topo do provete; realizar 2 medições ao diâmetro perpendiculares entre si no centro do provete; realizar 2 medições ao diâmetro perpendiculares entre si na base do provete. Para todas as dimensões calcular a média. Determinar a massa do provete seco (m_1).

Cálculos

Provetes cilíndricos

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{\frac{\pi}{4} \times h \times d^2} \times 10^3 \text{ (Mg/m}^3\text{)} \quad (4.4)$$

Legenda:

$\rho_{b,dim}$ – baridade do provete – método geométrico (Mg/m³);

m_1 – massa do provete seco (g);

h – altura do provete (mm);

d – diâmetro do provete (mm);

Provetes prismáticos

$$\rho_{b,dim} = \frac{m_1}{h \times l \times w} \times 10^3 \text{ (Mg/m}^3\text{)} \quad (4.5)$$

Legenda:

$\rho_{b,dim}$ – baridade do provete – método geométrico (Mg/m³);

m_1 – massa do provete seco (g);

h – altura do provete (mm);

l – comprimento do provete (mm);

w – largura do provete (mm);

4.6 Ensaio da Resistência às Deformações Permanentes – Ensaio de Pista

Âmbito

A norma de ensaio EN 12697-22 descreve métodos de ensaio para determinar a suscetibilidade de materiais betuminosos para deformarem sob a ação de repetidas passagens de carga a uma temperatura constante. O ensaio é aplicável a misturas com D inferior igual a 32 mm. Os ensaios podem ser realizados a provetes retirados do pavimento ou a provetes produzidos em laboratório.

Método de ensaio

Os provetes de ensaio (300 x 300 x espessura variável) em mm podem ser obtidos através da produção de mistura betuminosa em laboratório e posterior compactação ou através de recolha de amostra em obra. Após a medição das dimensões dos provetes, cálculo da baridade, medição da planeza, os dois provetes de ensaio são colocados em moldes de ferro ou alumínio, e fixados a esses moldes com gesso. Colocar o provete (ou provetes) no equipamento e acondiciona-los a 60 ± 1 °C por um período de:

- 4 h (no mínimo) se a espessura do provete for igual ou inferior a 60 mm;
- 6 h (no mínimo) se a espessura do provete for superior a 60 mm;
- No máximo de 24 h.

(A espessura dos provetes será aquela em que a mistura em estudo será colocado em obra.)

Selecionar no software 26,5 ciclos por minuto e dar início ao ensaio. O ensaio deve ser programado para parar quando se atingir uma das seguintes situações:

- os 10 000 ciclos forem atingidos, ou;
- a rodeira atingir os 20 mm de profundidade.

Cálculos

- Profundidade da rodeira ao fim de 10000 ciclos: valor obtido diretamente do equipamento:

$$RD_{air}(mm) \quad (4.6)$$

RD_{air} – profundidade de rodeira ao fim de 10000 ciclos;

- Profundidade máxima da rodeira:

$$PRD_{air} = \frac{RD_{air}}{E} (mm) \quad (4.7)$$

- Declive máximo da rodeira:

$$WTD_{air} = \frac{d_{10000} - d_{5000}}{5} \left(\frac{mm}{10^3 \text{ ciclos}} \right) \quad (4.8)$$

Legenda:

E – espessura do provete (mm);

RD_{air} – profundidade de rodeira ao fim de 10000 ciclos;

RD_{air} – profundidade máxima de rodeira;

WTS_{air} – declive máximo de rodeira;

d_{5000}, d_{10000} – profundidade da rodeira após 5000 e 10000 ciclos, respectivamente.

4.7 Sensibilidade à água

Âmbito

O ensaio de Sensibilidade à água determina o efeito da saturação da água nas misturas betuminosas. Este ensaio é realizado de acordo com a norma de ensaio EN 12697-12 (método A) e EN 12697-23. É realizado sobre provetes moldados em laboratório ou provetes carotados.

Método de ensaio

Sobre seis provetes, efetuam-se o ensaio de baridade e medem-se os provetes. Após um período de estabilização entre de 16h e 24h agrupam-se os provetes em dois grupos análogos, cujas médias das alturas não pode variar mais que 5 mm e a média das baridades não pode variar mais que 0,015 Mg/m³. Um dos grupos será designado por grupo lmerso e o outro por grupo Seco. Inicia-se o acondicionamento dos provetes:

- Grupo lmerso: Coloca-se os provetes dentro de um banho de água destilada a 20±5 °C. Sela-se o banho de água com os provetes no seu interior e aplica-se vácuo até atingir os de 67±3 hPa. O vácuo deve ser aplicado lentamente, 10±1 min, de modo a

evitar a expansão anormal dos provetes. Mantêm-se os provetes em vácuo durante 30±5 min. Retira-se o vácuo lentamente de modo a retomar a pressão atmosférica. Deixam-se os provetes imersos durante outros 30±5 min. Calcula-se o volume destes provetes. No caso de aumentarem mais de 2 % em volume rejeitam-se os provetes. Colocam-se os provetes em banho de água a 40±1 °C por um período de 68 a 72h. Findo este tempo retiram-se os provetes do banho de água de 40±1 °C e colocam-se num banho de água a 15±2 °C por um período mínimo de 2 horas.

- Grupo Seco: Mantêm-se os provetes em laboratório, numa superfície plana à temperatura ambiente de 20±5 °C, durante o período de tempo semelhante ao do grupo Imerso. Coloca-se os provetes à temperatura de ensaio 15±2 °C, durante um mínimo de 2h, de uma das seguintes formas:
 - Em banho de água, protegendo o provete da água através do uso de saco de plástico ou outro tipo de proteção adequado à água;
 - Em estufa com refrigeração apropriada.

Após o acondicionamento de ambos os grupos, determinar a tensão indireta em todos os provetes: Coloca-se o provete no estabilómetro e leva-se à rotura. O tempo decorrido entre retirar o provete do acondicionamento e leva-lo à rotura deve ser, no máximo, de 1 minuto.

Regista-se o valor de máxima tensão obtido. Após a rotura, observar o provete e registar o seguinte:

- Tipo de rotura;
- Presença de agregado fratura ou esmagado;
- Superfície revestida no agregado exposto.

Cálculos

- Para cada provete individual é calculada a tração indireta da seguinte forma:

$$ITS = \frac{2P}{\pi DH} \quad (4.9)$$

Legenda:

ITS – tração indireta (*indirect tensile strenght*) (GPa)

P – Força de rotura (kN);

H – altura do provete (mm);

D – diâmetro do provete (mm);

- De seguida calcula-se o valor médio de ITS para cada um dos grupos: grupo imerso (ITS_w) e seco (ITS_d);
- Finalmente é calculado a resistência conservada em tração indireta ($ITSR$):

$$ITSR = 100x \times \frac{ITS_w}{ITS_d} \quad (4.10)$$

Legenda:

$ITSR$ – Resistência conservada em tração indireta (*indirect tensile strenght ratio*), %;

ITS_w – Tracção indiecta média do grupo imerso (kPa);

ITS_d – Tracção indiecta média do grupo seco (kPa).

4.8 Determinação das características volumétricas de provetes betuminosos

Âmbito

A norma EN 12697-8 define equações matemáticas para calcular três características volumétricas de uma amostra de mistura betuminosa compactada: o índice de vazios, vulgo porosidade, (V_m), o índice de vazios no agregado mineral que estão ocupados por ligante (V_{FB}) e os vazios no agregado mineral (V_{MA}).

Os métodos de ensaio são aplicáveis à utilização de provetes compactados fabricados em laboratório ou de carotes retiradas do pavimento após colocação e compactação.

Porosidade

A porosidade pode ser definida por: volume de vazios num provete de mistura betuminosa, expresso em percentagem do volume total do provete.

Cálculo

$$V_m = \frac{\rho_m - \rho_b}{\rho_m} \times 100\% \quad (4.11)$$

Legenda:

V_m – porosidade (%)

ρ_m – baridade máxima teórica (Mg/m^3);

ρ_b – baridade dos provetes compactados (Mg/m^3);

Vazios no agregado mineral (VMA)

Volume inter-granular de vazios entre as partículas de agregado numa mistura betuminosa compactada, que inclui os vazios e o volume de ligante betuminoso na amostra, expresso como uma percentagem do volume total da amostra.

Cálculo

$$VMA = V_m + B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \times 100\% \quad (4.12)$$

Legenda:

VMA – vazios no agregado mineral (%)

V_m – porosidade (%);

B – percentagem de betume da mistura betuminosa (%);

ρ_b – baridade dos provetes compactados (Mg/m^3);

ρ_B – Massa volúmica do betume (Mg/m^3);

Vazios ocupados por ligante (VFB)

Percentagem de vazios no agregado mineral, ocupados por ligante.

Cálculo

$$VFB = \left[\left(B \times \frac{\rho_b}{\rho_B} \right) / VMA \right] \times 100\% \quad (4.13)$$

Legenda:

VFB – Percentagem de vazios no agregado mineral, ocupados por ligante(%)

VMA – vazios no agregado mineral (%)

B – percentagem de betume da mistura betuminosa (%);

ρ_b – baridade dos provetes compactados (Mg/m^3);

ρ_B – Massa volúmica do betume (Mg/m^3);

4.9 Índice de Resistência Conservada

A descrição deste ensaio é apresentada no Anexo Nacional, sendo que esta deriva da norma militar americana MILSTD-620A.

Método de ensaio

É fabricada a mistura betuminosa em estudo e são compactados 8 provetes. Determina-se a baridade em todos os provetes. Os provetes são agrupados em 2 grupos cuja média da baridade de cada grupo seja o mais semelhante possível. De seguida é realizado o ensaio Marshall sobre 4 dos provetes, após imersão durante 35 a 40 minutos num banho de água a 60 °C, e sobre os restantes 4 provetes, após imersão durante 24 horas num banho de água à mesma temperatura.

Cálculo

O quociente, em percentagem, entre o valor médio da estabilidade Marshall dos provetes imersos 24 horas e o valor médio da estabilidade dos provetes imersos 35 a 40 minutos é o Índice de Resistência Conservada.

4.10 Medição da temperatura

Método de ensaio

Na norma de ensaio EN 12697-13 é descrito um método de ensaio para medição da temperatura das misturas betuminosas a quente durante o armazenamento, transporte e colocação. Neste ensaio, uma sonda é conectada a um dispositivo de medição de

temperatura. É medida a temperatura em várias posições de profundidade na mistura betuminosa e calculada a média das temperaturas.

4.11 Rigidez

Princípio

As misturas betuminosas têm na sua constituição um esqueleto pétreo de comportamento elástico e um ligante betuminoso com comportamento visco-elástico. Desta forma o comportamento das misturas é fortemente influenciado pela reologia do betume, tanto quanto maior for a percentagem de betume presente na mistura (Neves, et al.). Assim pode-se afirmar que a rigidez de uma mistura betuminosa depende essencialmente da rigidez do betume.

A norma de ensaio EN 12697-26 define métodos para caracterizar a rigidez das misturas betuminosas em alternativa a outros, incluindo testes de flexão e ensaios de tração diretos e indiretos. Os ensaios são realizados em material betuminoso compactado sob uma carga sinusoidal usando vários provetes.

O módulo de rigidez pode ser definido como as relações entre as amplitudes das tensões aplicadas e das deformações medidas. O ângulo de fase é uma medida do desfasamento entre as tensões e as deformações, permitindo inferir se o comportamento da mistura betuminosa é predominantemente elástico (ângulo de fase nulo) ou viscoso (Neves, et al., 2006).

Este procedimento é utilizado para avaliar misturas betuminosas com base na rigidez e como uma possível orientação para o relativo desempenho no pavimento, de modo a obter dados para estimar o comportamento estrutural do pavimento e avaliar este de acordo com as especificações das misturas betuminosas em estudo.

A norma especifica vários métodos de ensaio com diferentes equipamentos. De momento em Portugal usa-se o 4PB-PR. O ensaio é realizado aplicando tensão em quatro pontos de um provetes prismático.

Método de ensaio

São produzidos 6 provetes de ensaio. São avaliadas as suas dimensões e baridade de cada provete. Após um período de estabilização de 15 dias, os provetes são colocados

individualmente no equipamento de ensaio e ensaiados (apenas 4 provetes são ensaiados, os dois restantes destinam-se a armazenamento de amostra).

Cálculos

O módulo de rigidez, em MPa, é a média resultante dos 4 provetes para as frequências de 0,2 Hz, 0,5Hz, 1Hz, 5Hz e 10Hz, sendo que a média dos 4 provetes a 10Hz é a de maior importância, considerando que esta frequência corresponde a 1/60 Km/h no cálculo do dimensionamento pela via fundamental.

4.12 Fadiga

Princípio

A norma de ensaio EN 12697-24 especifica os métodos de ensaio para a caracterização da fadiga de misturas betuminosas.

Os ensaios são realizados com material betuminoso compactado sob um carregamento sinusoidal ou carga controlada, utilizando diferentes tipos de amostras e suporte.

O procedimento é utilizado para classificar as misturas betuminosas com base na resistência à fadiga, como um guia para o desempenho relativo no pavimento, para obter dados para estimar o comportamento estrutural na estrada e para analisar dados de ensaio, de acordo com as especificações para misturas betuminosas.

O parâmetro e_6 , que corresponde ao valor considerado ruína para determinada mistura- 10^6 ciclos, é adequado para hierarquizar as misturas em termos de resistência à fadiga, no âmbito de estudos de formulação (Capitão, et al., 2004).

A norma especifica vários métodos de ensaio com diferentes equipamentos. De seguida irá descrever-se o 4PB-PR. O ensaio é realizado aplicando tensão em quatro pontos de um provetes prismático.

Método de ensaio

São produzidos 18 provetes de ensaio. São avaliadas as suas dimensões e baridade de cada provete. Os provetes são colocados individualmente no equipamento de ensaio e ensaiados.

Os 18 provetes são divididos em 3 grupos com 6 provetes cada. Cada um dos grupos será sujeito a uma extensão de ensaio diferente. Todos os ensaios são realizados a uma temperatura e frequência igual, 20°C e 10 Hz, respetivamente. A temperatura e frequência de ensaio poderá variar de acordo com o solicitado pelo CE e/ou as normas de produto.

Após o ensaio dos 18 provetes, produz-se um gráfico onde nos eixos das abcissas descreve se o número de ciclos de carga e em ordenadas o nível de extensão. Da equação obtida através do gráfico de regressão linear calcula-se o número e ciclos de carga para 1.000.000 ciclos. De seguida é apresentado um gráfico típico (Figura 4.1) deste ensaio.

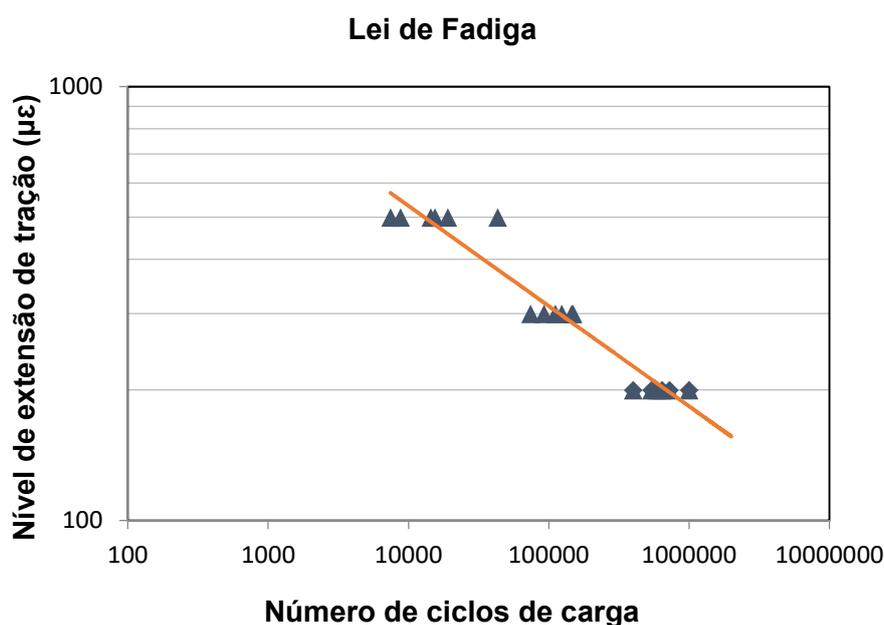


Figura 4.1-Exemplo Lei de Fadiga (LGMC,2016)

Do ensaio de fadiga pode-se obter a informação quanto à redução da resistência de um material sob cargas repetidas quando em comparação com a força sob uma carga única. A avaliação clássica da resistência à fadiga duma mistura betuminosa é feita considerando que a ruína do provete ocorre no momento em que o seu módulo de deformabilidade (E_{mist}) se reduz duma certa percentagem do seu valor inicial (em geral 50%) (Capitão, et al., 2004)

4.13 Ensaio de PCG (presse à cisaillement giratoire) - Prensa de cisalhamento giratória

Princípio

A norma de ensaio EN 12697-31 especifica um método para a determinação de capacidade de compactação de provetes de misturas betuminosas por compactador giratório. O ensaio calcula a percentagem de vazios e a compactação consoante o número de rotações (giros) usando a altura medida do provete moldado, Figura 4.2. Este ensaio é usado para otimizar a formulação da mistura betuminosa em determinados países.

Método de ensaio

Introduzir 4,7 kg de mistura num molde com 150 mm de diâmetro. Com as condições de ensaio são: pressão de 600 kPa, ângulo de 1,25° e velocidade de 30 rotações/minuto, medir a altura do provete com a quantidade de rotações (giros).

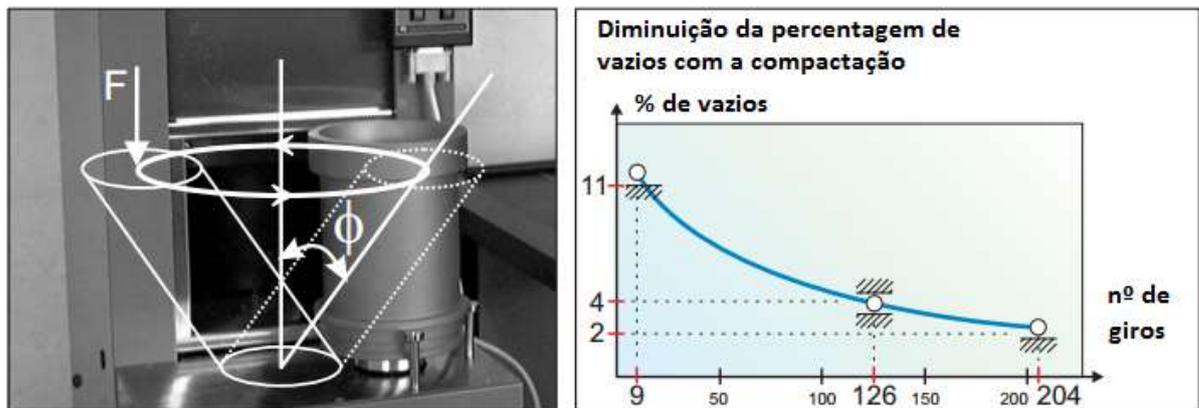


Figura 4.2 Ensaio de (PCG) Prensa de cisalhamento giratória (Institut fur Materialprufung, 2016)

4.14 Considerações finais

O presente capítulo apresentou, de uma forma sucinta, os ensaios necessários à abordagem empírica e fundamental para a realização de uma formulação de misturas betuminosas a quente.

Pretendeu-se dar a conhecer resumidamente os métodos de ensaio mais frequentes na formulação das misturas betuminosas a quente de acordo com as normas europeias.

Embora nem todos os ensaios descritos façam parte da presente formulação “oficial” para misturas betuminosas a quente, prevê-se que num futuro próximo o sejam, como por exemplo os ensaios de fadiga e rigidez.

5. Comparação entre fusos granulométricos da IP e da Brisa

Neste capítulo estuda-se, comparativamente, os fusos granulométricos do CE da IP e os fusos granulométricos da BRISA.

A comparação dos fusos foi realizado tendo por base a camada em que aquela determinada mistura iria servir e o D máximo da mistura de agregados.

A maior diferença entre concessionárias é: a BRISA ainda utiliza os peneiros ASTM. A EP, quer por imposição Europeia, quer por uma questão de uniformidade com os ensaios e com as normas harmonizadas, tem os seus fusos com os peneiros EN.

Um pequeno à parte: a diferença entre os peneiros EN e peneiros ASTM, encontra-se nos tamanhos das aberturas das malhas. Os peneiros EN, as aberturas das malhas têm uma justificação métrica, ou seja, a maioria das aberturas são subdivisões do metro. Nos peneiros ASTM, as aberturas das malhas têm por base a polegada³ e são subdivisões da polegada. Por razões históricas e por haver necessidade, a série de peneiros EN ainda possui algumas aberturas de malha com subdivisões não métricas, nomeadamente 6,3mm e 22,4mm.

Os peneiros EN são referenciados pelo tamanho da abertura da sua malha, os peneiros ASTM são referenciadas por um número, que corresponde a uma abertura de uma malha, o que torna o trabalho rotineiro um pouco mais difícil, uma vez que tem de ser feita a correspondência entre número de peneiro e abertura de malha.

Esta comparação é realizada sobre a mistura de agregados. Ou seja, a percentagem de betume não está incluída.

5.1 Camadas de Base

As camadas de base têm essencialmente uma função estrutural, absorvendo as tensões induzidas pelas ações de tráfego e transmitindo-as de forma atenuada à fundação. Devem ser resistentes à fadiga, à propagação de fendas e à ação do tráfego (Portugal, 2010). Estas camadas possuem um D superior que as restantes camadas de misturas betuminosas (entre os 32 mm ou 20 mm). Uma vez que o seu esqueleto granular é constituído por partículas com dimensões maiores, a sua superfície específica será menor e assim será necessário menos

³ Uma polegada corresponde a 2,54 cm.

betume para cobrir todas as partículas de agregado. São as camadas com menos percentagem de betume.

5.1.1 Macadame betuminoso (Brisa) versus o AC 20 Base (MB) (IP)

O Macadame betuminoso da Brisa (item 1.9.4) foi comparado com o AC 20 Base (MB) do CE da IP, (rubrica 14.03.2.1.2). Os resultados apresentam-se na Figura 5.1.

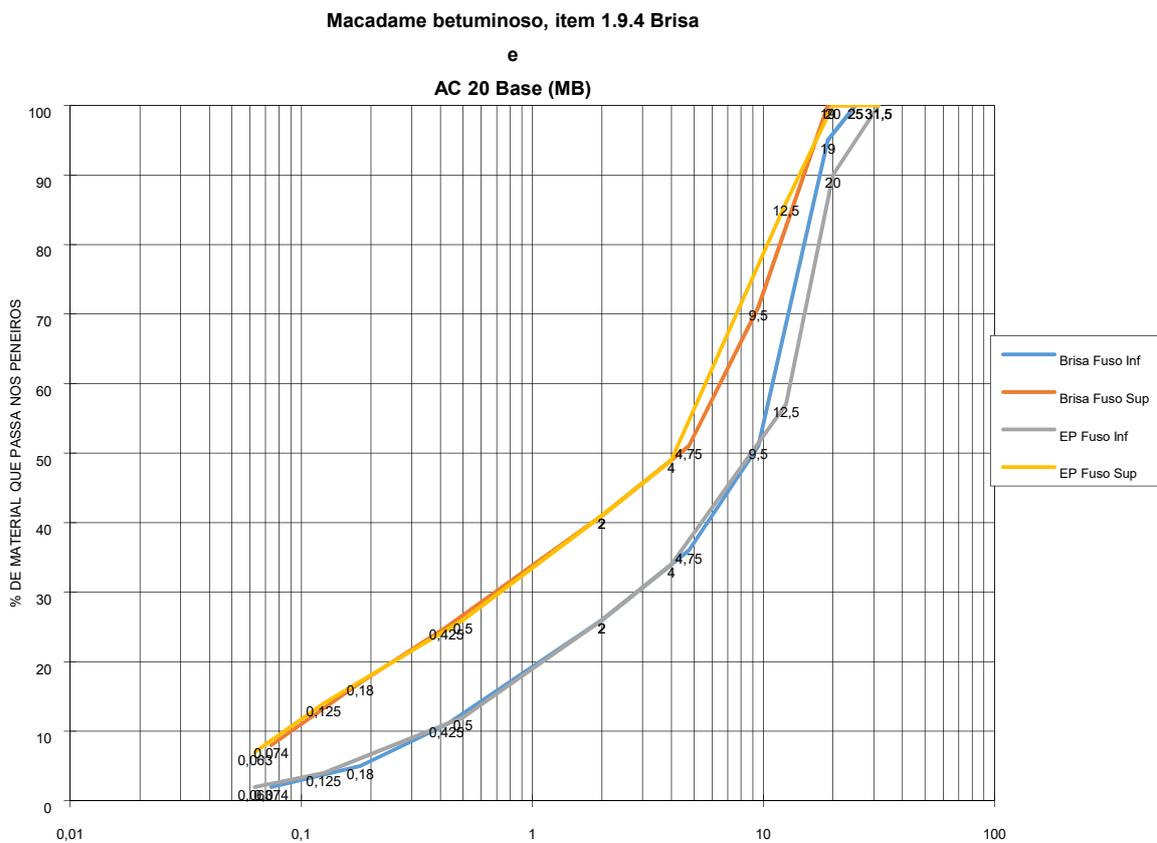


Figura 5.1 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Macadame Betuminoso Versus AC 20 Base (MB))

Podemos concluir pela sobreposição dos fusos que a BRISA é um pouco mais exigente quanto aos grossos que podem ser introduzidos na composição da mistura de agregados. O fuso é mais estreito desde os peneiros de maior dimensão até ao peneiro com abertura de 4mm.

5.1.2 Betão betuminoso de Alto Módulo- camada de base versus AC 20 Base (MBAM) (IP)

A designação alto módulo significa que a mistura foi produzida com um betume duro (em Portugal, normalmente o 10/20) que lhe atribui características de resistência necessárias a pavimentos com elevado tráfego e/ou com velocidades de circulação reduzidas.

O Betão betuminoso de Alto Módulo para camada de Base, item 1.9.5.1 foi comparado com o AC 20 Base (MBAM) do CE da IP, rubrica 14.03.2.1.3. Os resultados apresentam-se na Figura 5.2.

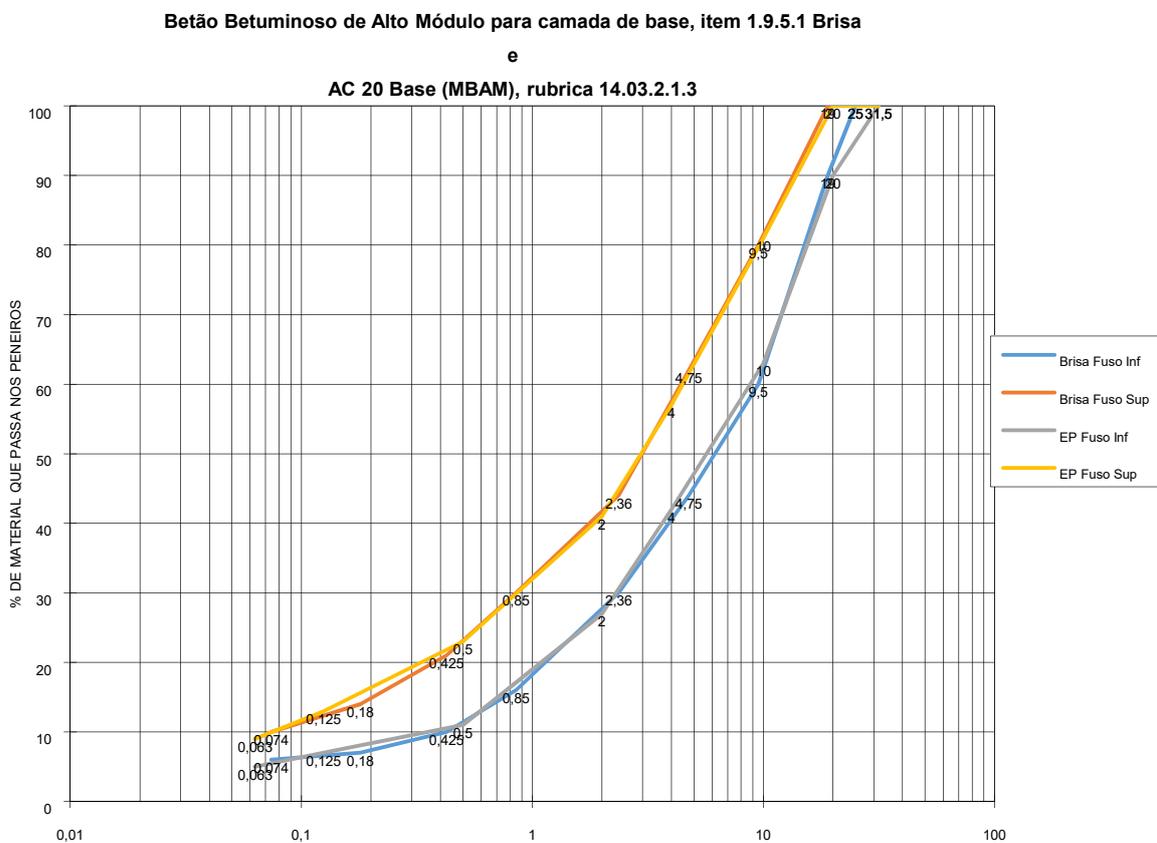


Figura 5.2 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Alto Módulo Versus AC 20 Base (MBAM))

Do gráfico acima apresentado, podemos concluir que os fusos são praticamente semelhantes, identificadas muitas sobreposições entre eles.

5.2 Camadas de Regularização

As camadas para camadas de regularização e ligação, colocadas entre as camadas de base e de desgaste, devem contribuir para garantir uma boa regularidade superficial do pavimento e impermeabilizar as camadas inferiores. As camadas de regularização podem ter espessuras variáveis, sendo por isso particularmente úteis em projetos de reabilitação (Portugal, 2010).

5.2.1 Betão betuminoso de Alto Módulo para camada de regularização (Brisa) versus o AC 16 Bin (MBAM) (IP)

O Betão betuminoso de Alto Módulo para camada de Regularização, item 1.9.5.2 foi comparado com o AC 16 Bin (MBAM) do CE da IP, rubrica 14.03.2.2.3. Os resultados apresentam-se na Figura 5.3.

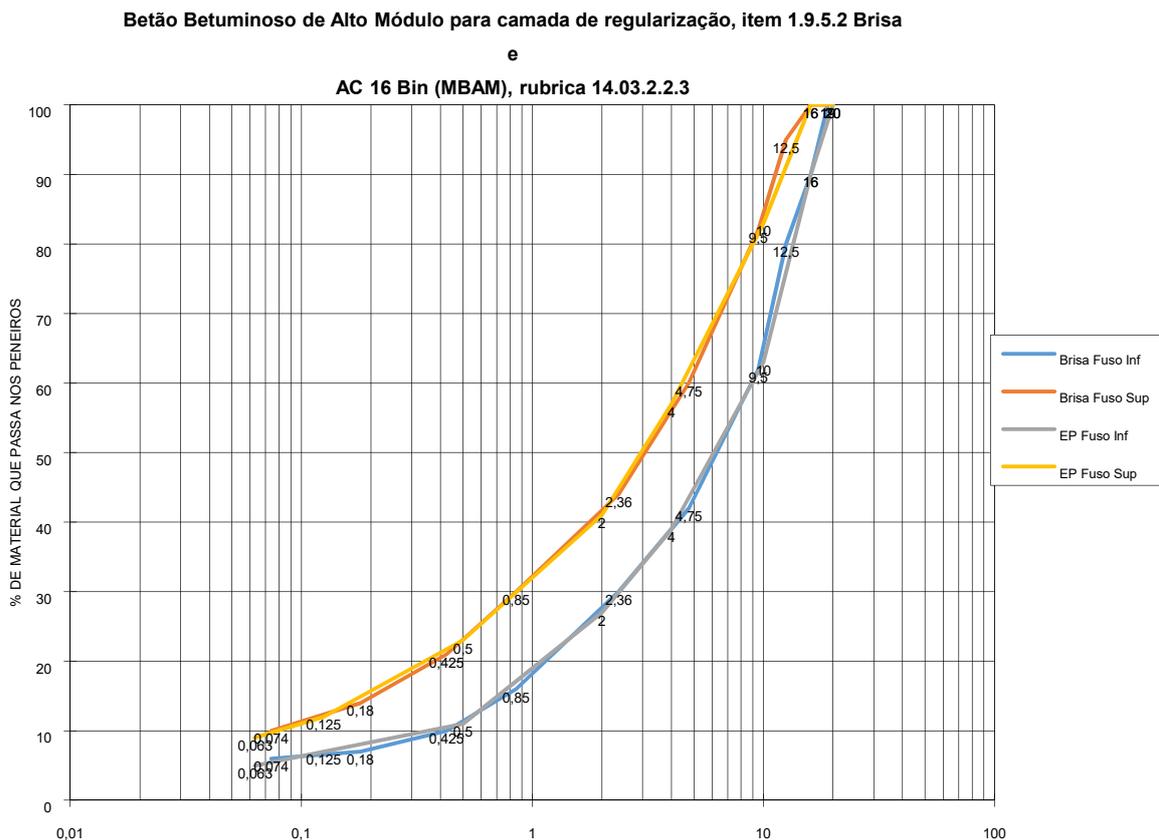


Figura 5.3 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Alto Módulo Reg Versus AC 16 Bin (MBAM))

Pode-se concluir que os fusos são semelhantes.

5.2.2 Mistura Betuminosa Densa (Brisa) versus o AC 20 Bin (MBD) (IP)

A Mistura Betuminosa Densa, item 1.9.6 foi comparada com o AC 20 Bin (MBD) do CE da IP, rubrica 14.03.2.2.2. Os resultados apresentam-se na Figura 5.4.

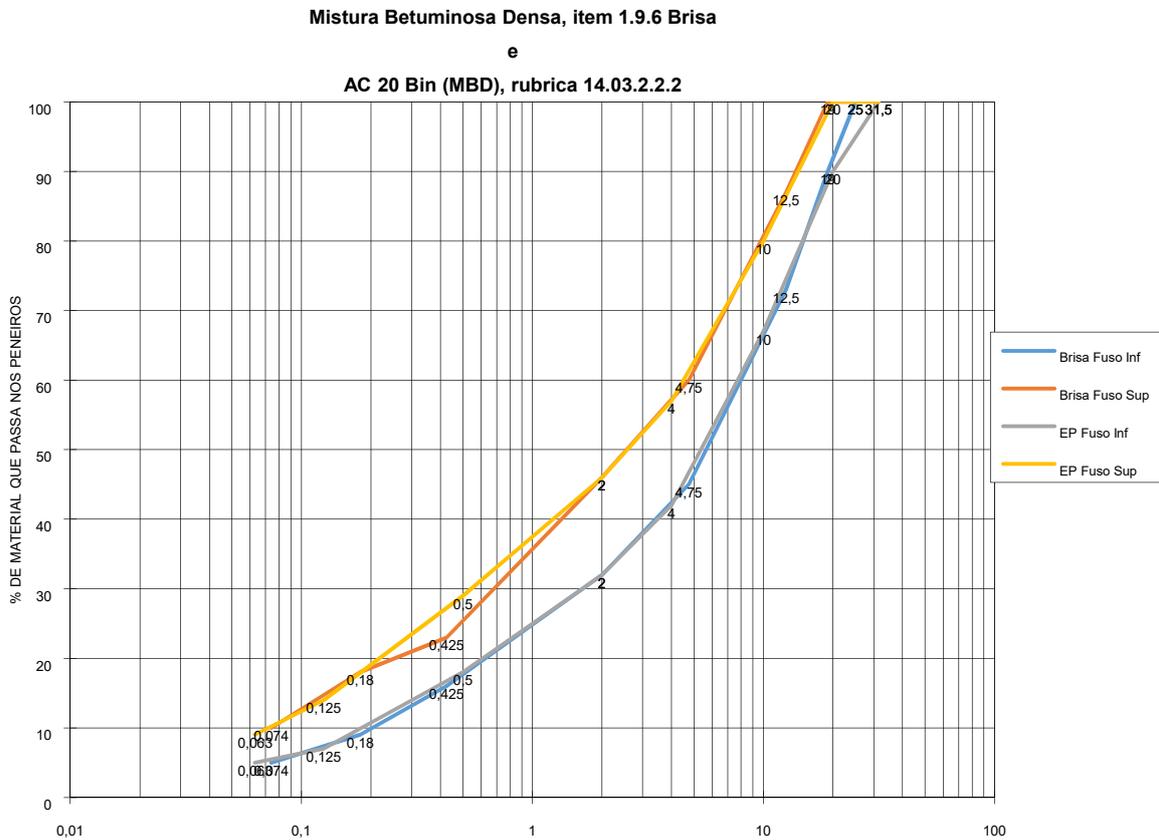


Figura 5.4 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Densa Versus AC 20 Bin (MBD))

Pode-se concluir que os fusos são semelhantes mas não iguais. O fuso da IP permite possuir mais folga quer nos grossos quer nos finos, nas tolerâncias entre 0,5 e 0,2mm.

5.2.3 Betão Betuminoso subjacente (BRISA) versus AC 14 Bin (BB) (IP)

O betão betuminoso subjacente às camadas de desgaste ou drenantes foi comparado com o AC 14 Bin (BB) do CE da IP, rubrica 14.03.2.2.4. Os resultados apresentam-se na Figura 5.5.

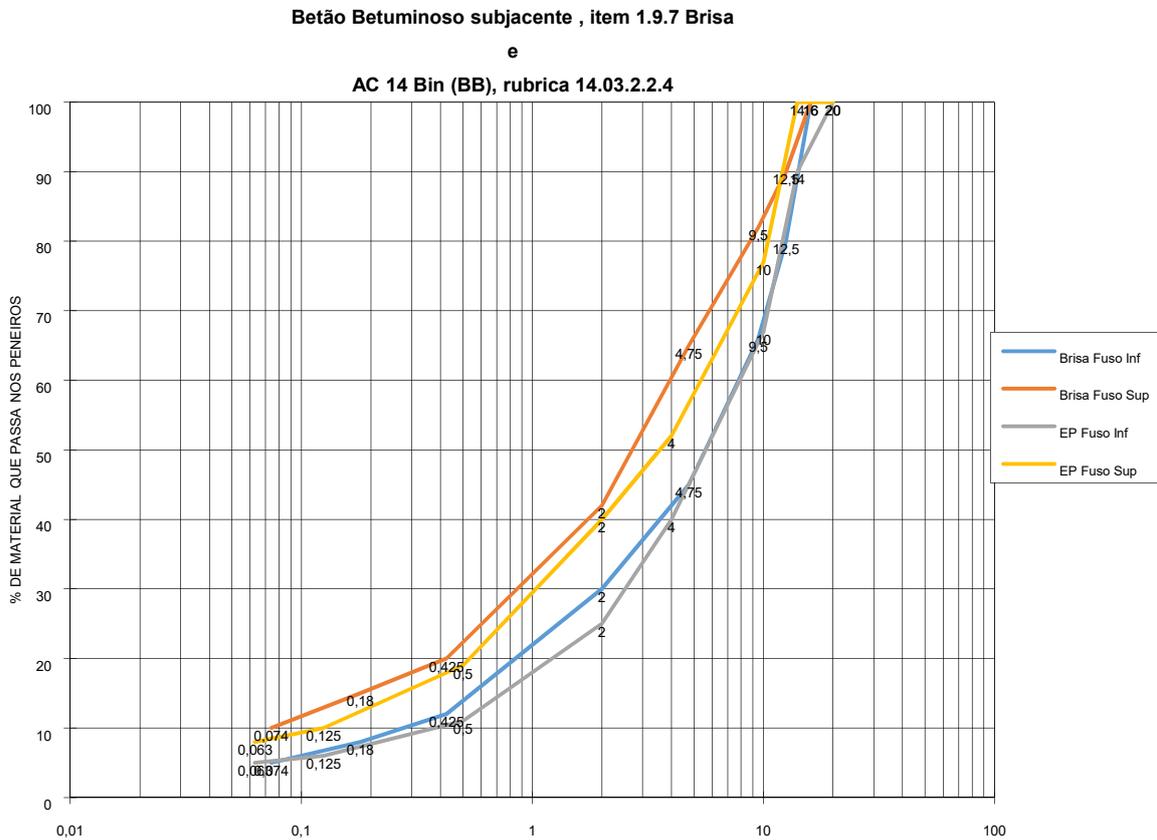


Figura 5.5 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. subjacente Versus AC 14 Bin (BB))

O fuso de betão betuminoso subjacente às camadas de desgaste e rugosa foi o fuso mais difícil de comparar uma vez que não existe um fuso com características semelhantes no CE da IP. O mais aproximado possível encontrado foi o AC 14 Bin (BB). No entanto, pela observação do gráfico, percebe-se que os fusos são diferentes, sendo que o da Brisa é consideravelmente mais fino.

5.2.4 Microbetão Betuminoso (BRISA) versus AC 14 Reg (BB) (IP)

O microbetão Betuminoso para regularização dos tabuleiros das obras de arte, item 1.9.8 foi comparada foi comparado com o AC 14 Reg (BB) do CE da IP, rubrica 14.03.2.3.3. Os resultados apresentam-se na Figura 5.6.

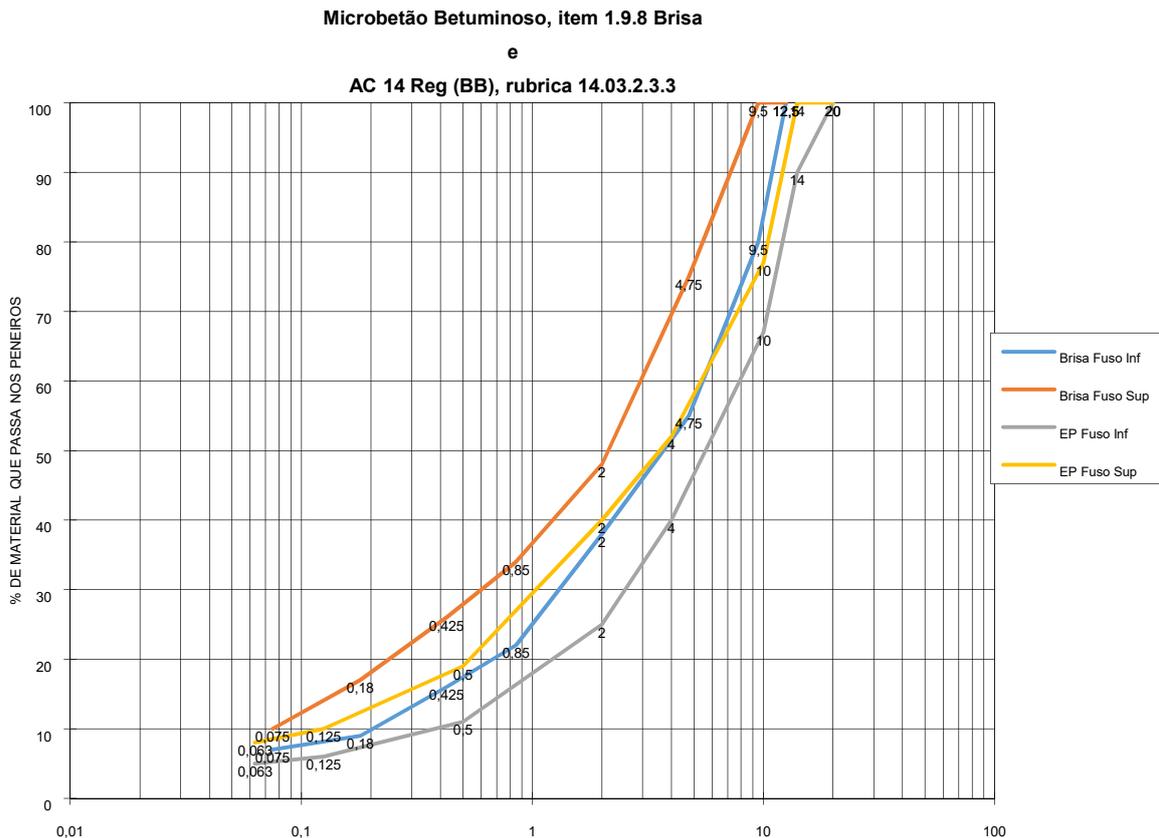


Figura 5.6 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Microbetão Betuminoso Versus AC 14 Reg (BB))

Pela observação do gráfico verifica-se que os fusos apenas se “tocam” entre si em situações fronteira, sendo por este motivo questionável a comparação de ambos os fusos apresentados. A razão de este fuso da BRISA em particular aparecer agrupado ao fuso da IP prende-se como facto de ser o fuso mais semelhante possível ao da BRISA, na CE da IP em vigor. Os fusos são semelhantes na sua continuidade e tolerâncias, embora não na abertura dos peneiros.

Pelos motivos acima apresentados pode-se concluir que este fuso da BRISA não tem análogo no CE da IP.

5.3 Camadas de Desgaste

As misturas betuminosas aplicadas em camadas de desgaste desempenham funções, tanto estruturais como funcionais. No entanto, as características funcionais são preponderantes na formulação destas misturas, o que tem levado ao desenvolvimento de misturas especiais para camadas de desgaste, tais como as misturas drenantes ou as misturas rugosas, de elevada textura e excelente comportamento em vias rápidas e na presença de água (Portugal, 2010).

O betão betuminoso (BB) aplicado em camada de desgaste é uma mistura pouco permeável, resistente à ação abrasiva do tráfego, cuja macrotextura pode ser relativamente baixa, pelo que nem sempre é a mais adequada para vias onde se verifiquem elevadas velocidades de circulação e em climas chuvosos (Portugal, 2010).

O Betão Betuminoso Drenante (BBD) tem características especiais para a aplicação em camada de desgaste, por forma a melhorar a segurança e comodidade de circulação. Este tipo de mistura é particularmente indicado para eliminar ou reduzir os problemas de hidroplanagem dos veículos que circulam sobre o pavimento com chuva e para reduzir o ruído do rolamento. Por outro lado, estas misturas apresentam menor resistência aos efeitos abrasivos do tráfego e podem colmatar-se quando aplicadas em zonas onde não chove com frequência e se acumule sujidade (Portugal, 2010).

As misturas rugosas proporcionam uma excelente macrotextura, tendo no entanto uma maior percentagem de material fino que as misturas drenantes, pelo que têm uma maior resistência à ação abrasiva do tráfego que o Betão Betuminoso Drenante (Portugal, 2010).

As misturas abertas, que recentemente têm sido aplicadas em Portugal, utilizando betumes modificados com borracha na sua composição, que possuem uma estrutura intermédia entre o betão betuminoso rugoso e betão betuminoso drenante (Portugal, 2010). Uma mistura betuminosa drenante tem uma porosidade entre os 22% e 30% e são designadas por PA (porous asphalt) e o seu D é de 12,5 mm (de acordo com a IP). A porosidade destas misturas é obtida através da descontinuidade do seu esqueleto mineral.

5.3.1 Betão Betuminoso para camada de desgaste (BRISA) versus AC 14 Surf (BB) (IP)

O Betão Betuminoso para a camada de desgaste, item 1.9.9 foi comparado com o AC 14 Surf (BB) do CE da IP, rubrica 14.03.2.4.1. Os resultados apresentam-se na Figura 5.7.

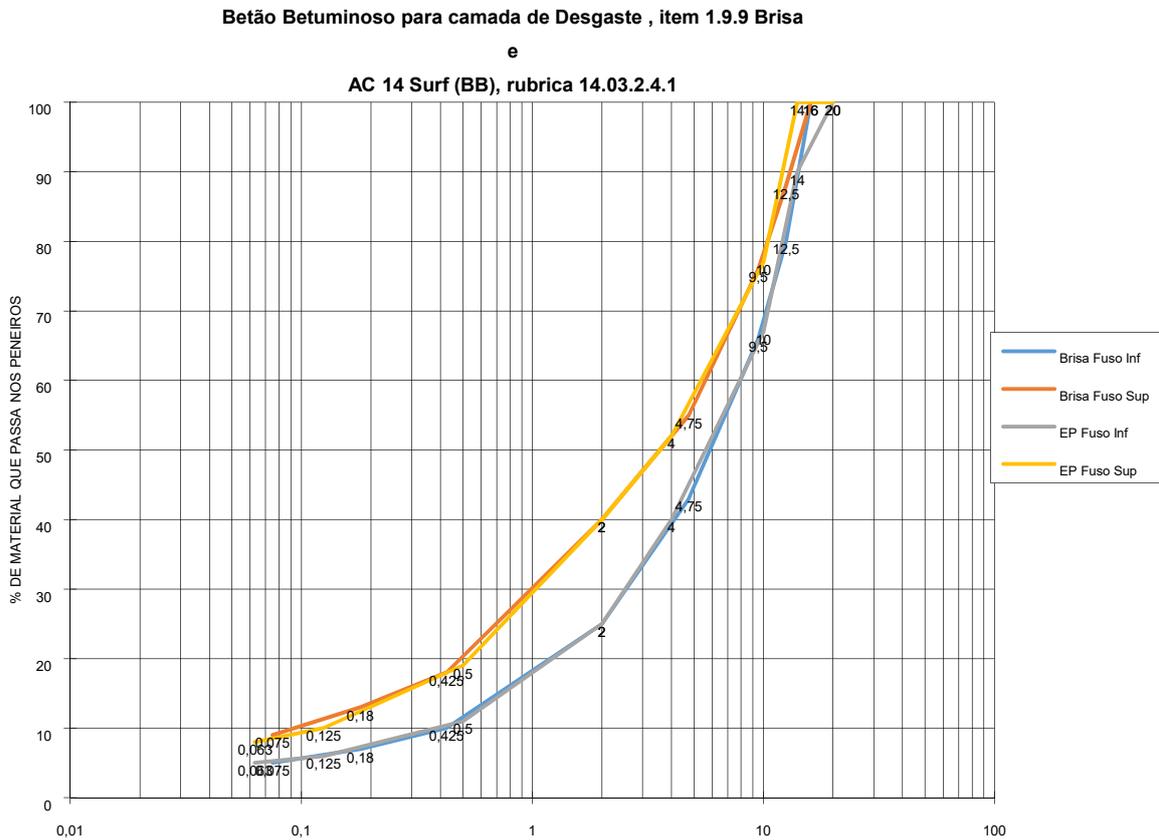


Figura 5.7 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Camada de Desgaste Versus AC 14 Surf (BB))

Os fusos são praticamente idênticos excetuando nas aberturas de 14mm e 20mm onde o CE da IP é um pouco mais permissivo.

5.3.2 Betão Betuminoso rugoso (BRISA) versus AC 14 Surf (BBr) (IP)

O Betão Betuminoso rugoso, item 1.9.10 foi comparado com o AC 14 Surf (BBr) do CE da IP, rubrica 14.03.2.4.4. Os resultados apresentam-se na Figura 5.8.

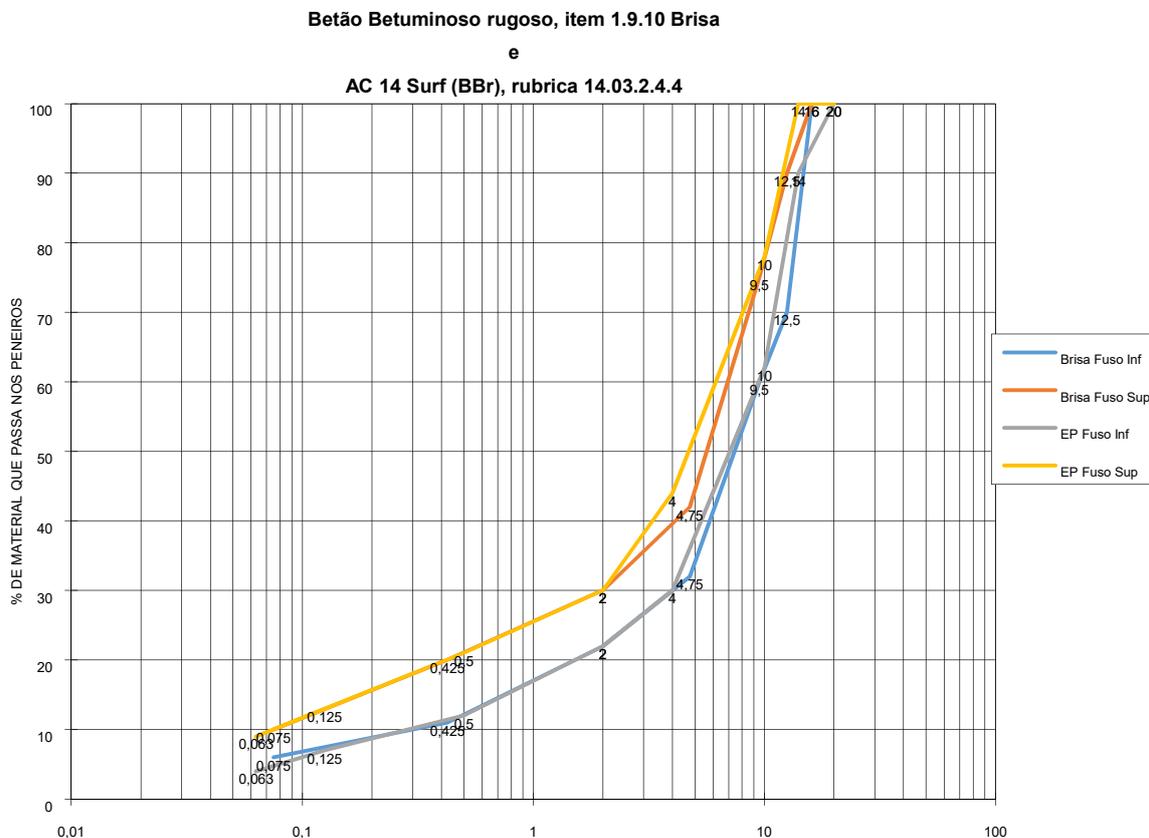


Figura 5.8 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Rugoso Versus AC 14 Surf (BBr))

Em termos comparativos podemos concluir que o fuso da BRISA é consideravelmente mais restritivo nas tolerâncias apresentadas para a fração grossa.

5.3.3 Betão Betuminoso drenante (BRISA) versus PA 12,5 (BBd) (IP)

O Betão Betuminoso drenante, item 1.9.11 foi comparado com o PA 12,5 (BBd) do CE da IP, rubrica 14.03.2.4.2. Os resultados apresentam-se na Figura 5.9.

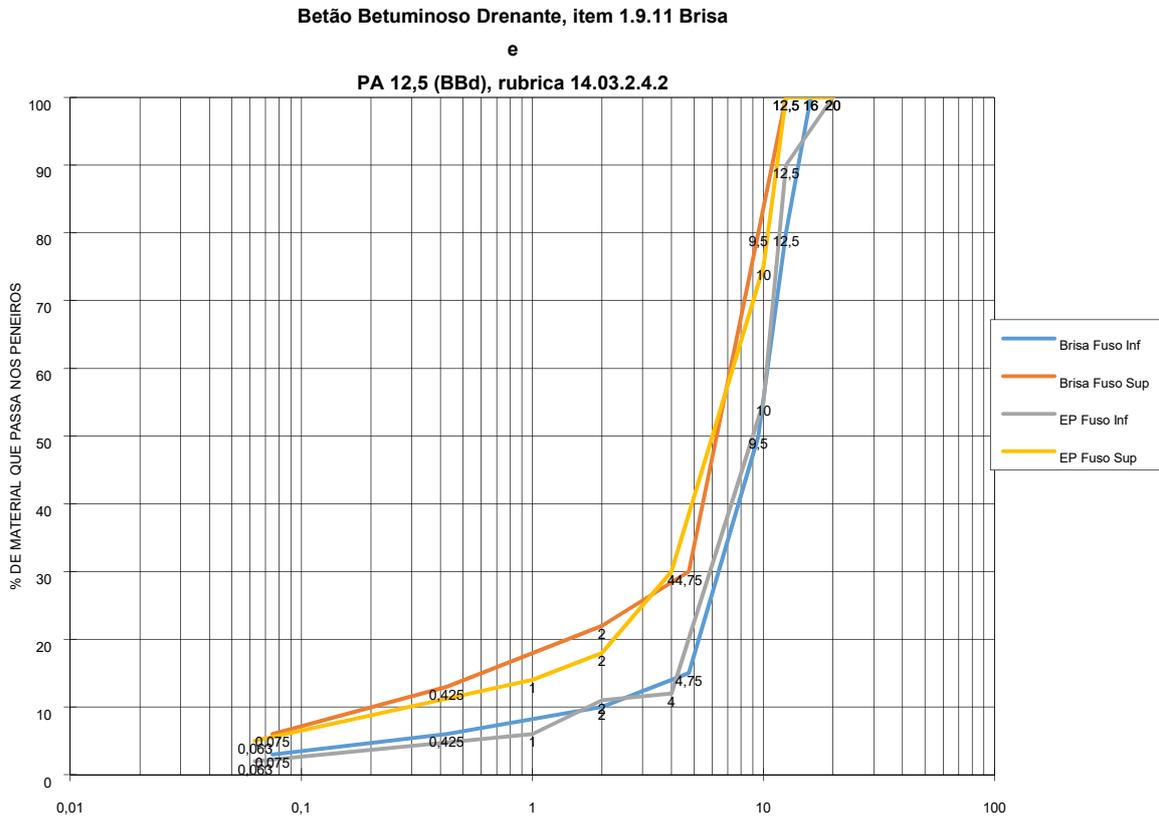


Figura 5.9 Fusos Granulométricos BRISA Versus IP (Bet. Drenante Versus PA 12,5 (BBd))

Pela observação do gráfico podemos concluir que os gráficos são semelhantes, apesar das diferenças notórias em algumas das dimensões, sendo o fuso da BRISA um pouco mais fino.

5.4 Considerações finais

Neste capítulo pretendia-se estabelecer uma ponte entre os cadernos de encargo da BRISA e do IP relativamente aos fusos granulométricos.

Da observação das comparações entre os fusos, conseguimos dizer que existem fusos muito semelhantes nos cadernos de encargos destas duas entidades com exceção do betão betuminoso subjacente.

Um trabalho futuro poderia passar pela comparação dos ensaios necessários aos agregados de cada um dos fusos, tendo em conta que estes ensaios são realizados através de normas de ensaio diferentes, a IP através das EN e a BRISA através das ASTM, NLT e NP.

6. Abordagens Empírica e Fundamental

6.1 Norma de produto NP EN 13108-1

A introdução da norma de produto NP EN 13108-1 menciona que o objetivo final é especificar o Betão betuminoso em termos de propriedades fundamentais baseadas no desempenho. No entanto dadas as diferenças de conhecimentos e experiências com as especificações fundamentais para este tipo de misturas na Europa, não é possível escolher apenas uma abordagem fundamental. Deste modo, os países com menos experiência na abordagem fundamental podem escolher, numa primeira fase, pela abordagem empírica e irem adquirindo experiência nos ensaios baseados no desempenho, de forma a encaminhar-se pelo uso cada vez mais generalizado da abordagem fundamental para especificar o betão betuminoso. Dado o atual estado da arte em Portugal, o presente Anexo Nacional da NP EN 13108-1 recomenda a especificação do betão betuminoso com base na abordagem empírica, prevendo-se, no entanto, que Portugal adquira brevemente experiência na abordagem fundamental.

A norma de produto do betão betuminoso, NP EN 13108-1, descreve 3 tipos de requisitos: gerais, empíricos e fundamentais. Para a abordagem empírica tem que se cumprir os requisitos gerais e empíricos. Para a abordagem fundamental tem que se cumprir os requisitos gerais e fundamentais.

Será descrito de seguida cada um dos requisitos em ambas as abordagens:

Os requisitos gerais (RG):

- Composição da mistura betuminosa (definição da fórmula de uma mistura em termos de materiais constituintes, de curva granulométrica e de percentagem de betume adicionada).
- Porosidade (valor máximo e mínimo);
- Revestimento e homogeneidade: quando descarregado do misturador, o material deve ter uma aparência homogénea, sendo que o agregado deve estar completamente revestido pelo ligante e que não deve existir qualquer evidência de aglomeração de agregados finos;
- Sensibilidade à água EN 12697-12 EN e 12697-23;
- Resistência à deformação permanente EN 12697-22; (valor máximo e mínimo);
- Temperatura da mistura EN 12697-13;
- Durabilidade.

Requisitos empíricos (RE):

- Composição, granulometria percentagem de ligante e aditivos;

- Aditivos;
- Vazios preenchidos com betume;
- Vazios na mistura de agregados.

Requisitos fundamentais (RF):

- Granulometria;
- Percentagem mínima de ligante;
- Rigidez;
- Fadiga.

Granulometria da mistura

Os requisitos gerais definem que a granulometria deve ser expressa em percentagens da massa total da mistura de agregados. Embora a norma de produtos defina quadros de limites gerais dos fusos granulométricos para as series base+1 e serie base +2, o AN recomenda o uso da serie de peneiros base+2.

Os RG definem para diferentes tipos de D a percentagem de material passado no 1,4D, D, 2 e 0,063. Os RE definem os intervalos que as percentagens em massa estão sujeitas, para além daquelas já estipuladas pelos RG. Os RE apertam um pouco os intervalos apresentados pelos RG. Para além dos peneiros definidos nos RG, 1,4, D, 2 e 0,063 os RE definem mais quatro peneiros obrigatórios: peneiro característico intermédio, peneiro extra opcional entre D e 2, peneiro característico intermédio, peneiro extra opcional entre 2 e 0,063. Como Portugal se encontra sobre a alçada da abordagem empírica, o AN inclui os peneiros extra opcionais entre D e 2 e os peneiros extra opcionais entre 2 e 0,063⁴.

De modo a tornar mais fácil o entendimento dos limites dos fusos granulométricos, tomou-se por exemplo a mistura AC 14 Surf (BB), uma das misturas mais usadas em Portugal, e fez a comparação entre os requisitos RE e RG e comparou-se com o AN. A comparação é apresentada de seguida:

⁴ Todas as aberturas dos peneiros em mm.

Tabela 6.1 Comparação entre os RG, RE, RF e AN

| Peneiro (mm) | RG/RF | RE | AN | |
|----------------------------------------|-------------------------------|------------------------|--------------|-------------------------------|
| | Massa de material passado (%) | Intervalos % por massa | Peneiro (mm) | Massa de material passado (%) |
| 1,4D | 100 | --- | 20 | 100 |
| D | 90 a 100 | 10 | 14 | 90 a 100 |
| Peneiro característico intermédio | --- | 10 a 30 | 10 | 67 a 77 |
| Peneiro extra opcional entre D e 2 | --- | 10 a 30 | 4 | 40 a 52 |
| 2 | 10 a 50 | 5 a 25 | 2 | 25 a 40 |
| Peneiro característico intermédio | --- | 4 a 25 | 0,5 | 11 a 19 |
| Peneiro extra opcional entre D e 0,063 | --- | 4 a 25 | 0,125 | 6 a 11 |
| 0,063 | 0 a 12 | 2 a 12 | 0,063 | 5 a 8 |

De salientar que os RE definem intervalos e não percentagem de material passado em massa, como é mais comum.

Neste caso em particular pode-se constatar o AN assume intervalos relativamente apertados para a fração grossa⁵, de seguida abre um pouco os intervalos, indo a um máximo de 15 % de percentagem de material passado no peneiro 2 mm e novamente estreita a malha para os peneiros 0,5 mm, 0,125, mm e 0,063 mm, tendo o pico de aperto para o último peneiro onde o intervalo da percentagem de material passado é apenas 3%.

O RF tem por características na granulometria apenas o definido pelos RG, sendo por este motivo muito mais permissivo que os RE.

Percentagem em ligante

Os RG definem que a percentagem em ligante deve ser expressa em percentagem da massa total da mistura betuminosa não realizando mais nenhuma imposição.

Os RE referem que a percentagem em ligante mínima deve ser seleccionada uma entre várias categorias (de acordo com o Anexo I 11) e de seguida deve ser efetuada uma correção associada à massa volúmica dos agregados, através da seguinte fórmula:

⁵ Considera-se fração grossa à percentagem de material retido do peneiro 4mm e fração fina à percentagem de material passado no peneiro de 4mm.

$$a = \frac{2,650}{\rho d} \quad (6.1)$$

Em que ρd representa a média ponderada das massas volúmicas das partículas secas em estufa dos agregados da mistura de agregados, em megagrama por metro cúbico (Mg/m^3), determinada de acordo com a EN 1097-6.

Os RF referem a percentagem mínima em ligante deve ser de 3,0%.

Os RE são consideravelmente mais exigentes do que os RG e os RF impondo uma classificação mínima associada a um fator de correção às massas volúmicas dos componentes. Dá-se assim uma maior autonomia aos RF ao variar a percentagem em ligante consoante os resultados obtidos nos ensaios fundamentais, não estando preso a nenhuma classificação.

O AN define percentagens de betume mínimas para cada uma das misturas betuminosas. As percentagens mínimas encontram-se descritas no Anexo 2. O valor de percentagens de betume mínimas a declarar deverá ser obtido de acordo com a expressão:

$$B_{min} = \frac{B_{formulação}}{\alpha} \quad (6.2)$$

Onde B_{min} - Percentagem em betume mínimo; $B_{formulação}$ - Percentagem em betume obtido no estudo de formulação e α – valor obtido na equação (6.2).

Existe uma observação nos RE relativa à introdução de misturas betuminosas recuperadas nas quais foi utilizado betume modificado e/ou um aditivo de modificação, e/ou quando a própria mistura contém um betume modificado ou um aditivo: a quantidade de misturas betuminosas recuperadas não deve exceder os 10% da massa total da mistura, para as camadas de desgaste e 20% da massa total da mistura para camadas de base, ligação e regularização. A introdução de misturas betuminosas fresadas em misturas betuminosas novas está regulado pela (472 Especificação LNEC, 2009) que refere a introdução de mistura betuminosa fresada até um máximo de 10% de fresado para camadas de desgaste e até um máximo de 50% nas camadas de base. Existe um conflito entre a norma de produto NP EN 13108-1 e a especificação do LNEC nesta matéria. A norma vigente em Portugal é consideravelmente mais permissiva, embora os materiais tenham que ser sujeitos a um grande número de avaliações.

De acordo com a especificação do LNEC (472 Especificação LNEC, 2009) todo o material fresado tem que ser submetido uma bateria de ensaios, nomeadamente: Presença de matéria estranha na mistura betuminosa recuperada (de acordo com a EN 12697-42); ligante presente na mistura fresada, tipo (betume de pavimentação, betume duro ou betume modificado) e características (penetração e anel e bola); dimensão máxima das partículas da mistura betuminosa recuperada, granulometria média e dimensão máxima, D (todos os ensaios mencionados são obtidos através de análise granulométrica); percentagem média de ligante na mistura betuminosa recuperada (EN 12697-1) e teor máximo da mistura betuminosa recuperada (EN 12697-14). Após a realização dos ensaios acima mencionados os resultados tem de ser classificados com a especificação LNEC e de seguida terá de se realizar um estudo de formulação com a incorporação da percentagem de fresado que se pretende incluir na mistura betuminosas novas. Só após conclusão do estudo de formulação de poderá avançar para a comercialização do produto de mistura nova com percentagem de material recuperado (fresado).

Porosidade

Esta característica faz parte dos RG. Terá de se selecionar uma classificação quer para a porosidade máxima quer para a porosidade mínima para cada mistura betuminosa.

O AN define uma porosidade máxima e mínima para cada tipo de mistura betuminosa. Os intervalos variam em 3% para as misturas betuminosas fechadas.

O ensaio da porosidade é realizada através do ensaio descrito em 4.8. Esta características são essenciais para aplicação do estudo de formulação pelo método Marshall.

Revestimento e homogeneidade

Trata-se de um RG. Quando descarregado do misturador, o material deve ter uma aparência homogénea, sendo que o agregado deve estar completamente revestido pelo ligante e que não deve existir qualquer evidência de aglomeração de agregados finos (NP EN 13108-1).

Sensibilidade à água

Este é um RG. Este ensaio é descrito no item 4.7. Deve ser definir um valor mínimo da resistência conservada em tração indireta de acordo com o Anexo I 6. A nível nacional

verifica-se a solicitação deste ensaio, no entanto, não é exigido um valor mínimo /limite. O AN enuncia que esta característica deve ser declarada.

Resistência à deformação permanente (ensaio de pista/ wheeltracking)

Este é um RG. Este ensaio é descrito no item 4.6. Deve ser declarado o valor máximo para os parâmetros: declive máximo da rodeira, WTS_{AIR} , de acordo com o Anexo I 7 e deve ser declarado o valor máximo para a característica profundidade máxima da rodeira, PRD_{AIR} , de acordo com o Anexo I 8. O AN refere ambos os parâmetros devem ser declarados (mas não impõe valores).

Temperatura da mistura

Esta característica é um RG. Este ensaio é descrito no item 4.10. A norma de produto define limites de temperatura da mistura para betumes de pavimentação Anexo I 9. A temperatura máxima aplica-se a qualquer local dentro da central de fabrico, enquanto a temperatura mínima se aplica no momento de entrega. Quando for usado um betume modificado, um betume duro de pavimentação ou aditivos, podem ser aplicáveis diferentes temperaturas (NP EN 13108-1).

Durabilidade

Esta característica é um RG. A norma de produto NP EN 13108-1 define que: O betão betuminoso deve ser considerado durável por uma vida razoável, sendo que uma vida razoável é o período de tempo durante o qual será mantido o desempenho as construção (ou da camada construída) a um nível compatível com o desempenho das características declaradas (NP EN 13108-1). Ou seja, o pavimento deve durar, no mínimo, a vida útil de projeto.

Aditivos

Trata-se de um RE. Os aditivos devem ser expressos em termos de tipo e quantidade de cada aditivo constituinte.

Vazios Preenchidos com Betume e Vazios na Mistura de Agregados

Ambas as características são RE. Na Figura 2.2 encontram-se as ilustrações destas características. Ambas são calculadas através das equações apresentada no item 4.8. Os valores mínimo e máximo de vazios preenchidos por betume, VFB_{min} , VFB_{max} devem ser seleccionados do Anexo I 12 e do Anexo I 13, respetivamente. O valor mínimo vazios preenchido na mistura de agregados, VMA_{min} deve ser seleccionados do Anexo I 14. Anexo I 14 - Valor mínimo de vazios na mistura de agregados, $VMAMin$ (Quadro 20 da Nenhuma destas características é constante no AN, no entanto, o IP estabelece um valor mínimo para o VMA para todas as misturas betuminosas, com exceção do PA 12,5 onde esta característica é Não Requerida.

Rigidez

Trata-se de um RF. O ensaio é brevemente apresentado no item 4.11. Os valores mínimo e máximo da rigidez, S_{min} , S_{max} devem ser seleccionados do Anexo I 15 e Anexo I 16, respetivamente.

Fadiga

Trata-se de um RF. O ensaio é sumariamente apresentado no item 4.12. A resistência à fadiga deve ser declarado para fins da norma de produto, de acordo com o Anexo I 17.

6.2 Um exemplo do uso da abordagem fundamental

De modo a dar a conhecer o que se faz noutros países da EU, de seguida irá falar-se na abordagem que França faz aos estudos de formulação de misturas betuminosas a quente. O “método francês” foi escolhido por apresentar-se como um estudo onde é possível aplicar a abordagem fundamental.

França possui nomenclaturas um pouco diferentes das descritas na NP EN 13108-1 e apresentadas na tabela 2.1 da presente dissertação. Por exemplo a mistura betuminosa “BBME: béton bitumineux à module élevé (high modulus asphalt concrete)”- Betão betuminoso de alto módulo, está definido no AN por “AC 20 base ligante (MBAM)”. Esta divergência prende-se com o facto de França apresentar as nomenclaturas de misturas betuminosas consoante a quantidade de tráfego quantificada para determinado pavimento.

Assim, usando a abordagem fundamental, França definiu 5 níveis de formulação de misturas betuminosas consoante o nível de importância dada a determinada obra:

- Nível 0: definição da curva granulométrica e definição da percentagem em betume;
- Nível 1: ensaio de sensibilidade à água e ensaio de PCG (presse à cisaillement giratoire)– Prensa de cisalhamento giratória;
- Nível 2: ensaio de sensibilidade à água, ensaio de PCG e ensaio de pista;
- Nível 3: ensaio de sensibilidade à água, ensaio de PCG, ensaio de pista e ensaio de rigidez;
- Nível 4: ensaio de sensibilidade à água, ensaio de PCG, ensaio de pista, ensaio de rigidez e ensaio de fadiga.

O nível de formulação aplicado em cada situação obedece dos seguintes fatores: posição da camada no pavimento (conforme se se trata de um desgaste, regularização/ligação ou camada de base), do nível de tensão a que a camada irá ser sujeita e ao risco técnico a que a camada está associada (Sétra, 2008) .

Em relação ao fenómeno de aparecimento de fissuras, poderá ser necessário realizar o ensaio de pista de modo a assegurar que a mistura tem o comportamento adequado para determinado nível de tensão. Assim, se o clima tem determinadas características e se o nível de tensão sujeito no pavimento é grande, poderá ser necessário a realização do ensaio de pista (wheeltracking). Assim:

- Clima muito severo (e.g.: clima mediterrâneo), nível de tensão grande (e.g.: tráfego congestionado, pequenas velocidades), ensaio de pista obrigatório;
- Clima severo (clima continental), nível de tensão médio, tráfego congestionado, pequenas velocidades), o ensaio de pista poderá ser necessário;
- Normal (e.g.: clima continental), nível de tensão baixo (e.g.: tráfego não congestionado, velocidades normais), o ensaio de pista poderá ser realizado ou não (Sétra, 2008) .

Uma vez definido o nível de formulação mistura recorre-se a tabelas de modo a conhecer as características mínimas a serem alcançados e os métodos de ensaio a aplicar. São apresentados de seguida, a título de exemplo, duas tabelas constantes na publicação (Sétra, 2008). A primeira tabela 6.2, aplica-se às características empíricas, a segunda, tabela 6.3, às fundamentais.

Tabela 6.2- Exemplo de características mínimas das misturas betuminosas com a abordagem empírica, para camadas de Desgaste e Base, Anexo C (Sétra, 2008)

| Name, class, type | Binder | Binder content | % voids (GSC) | Water sensitivity** | Resistance to rutting |
|-------------------|-------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BBSG 1 0/10 | Type to be stated | TL _{min} 5.2 | V _{min} 5 to V _{max} 10 (60 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P₁₀ (≤10% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 1 0/14 | Type to be stated | TL _{min} 5.0 | V _{min} 4 to V _{max} 9 (80 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P₁₀ (≤10% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 2 0/10 | Type to be stated | TL _{min} 5.2 | V _{min} 5 to V _{max} 10 (60 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P_{7.5} (≤7.5% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 2 0/14 | Type to be stated | TL _{min} 5.0 | V _{min} 4 to V _{max} 9 (80 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P_{7.5} (≤7.5% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 3 0/10 | Type to be stated | TL _{min} 5.2 | V _{min} 5 to V _{max} 10 (60 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P₅ (≤5% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 3 0/14 | Type to be stated | TL _{min} 5.0 | V _{min} 4 to V _{max} 9 (80 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P₅ (≤5% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% |

** Water sensitivity NF EN 12697-12. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. The European version of November 2003 contains some inaccuracies that may affect the results and is currently being revised so that it includes a compression method derived from the standard NF P 98-251-1 (September 2002) Essais relatifs aux chaussées - Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés - Partie 1 : Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud (Test relating to pavements - Static test on bituminous mixtures - Part 1: DURIEZ test on hot-mix).
Until the revised version is published it is strongly recommended to use the second of these standards in order to characterize water sensitivity.

Table 21: Performance to be attained, with the empirical approach, for BBSG wearing courses and base courses

Tabela 6.3- Exemplo de características das misturas betuminosas com a abordagem fundamental, para camadas de Desgaste e Base, Anexo D (Sétra, 2008)

| Name, class, type | Binder | % voids (GSC) | Water sensitivity** | Resistance to rutting | Modulus | Fatigue |
|-------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BBSG 1 0/10 | Type to be stated | V _{min} 5 to V _{max} 10 (60 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P₁₀ (≤10% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> S_{min}500 (≥ 5,500 MPa at 15°C, 10Hz or 0.02s) -V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> ε₅₋₁₀₀ (≥100.10⁻⁶ at 10°C, 25Hz) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 1 0/14 | Type to be stated | V _{min} 4 to V _{max} 9 (80 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P₁₀ (≤10% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> S_{min}500 (≥ 5,500 MPa at 15°C, 10Hz or 0.02s) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> ε₅₋₁₀₀ (≥100.10⁻⁶ at 10°C, 25Hz) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 2 0/10 | Type to be stated | V _{min} 5 to V _{max} 10 (60 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P_{7.5} (≤7.5% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> S_{min}7,000 (≥ 7,000 MPa at 15°C, 10Hz or 0.02s) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> ε₅₋₁₀₀ (≥100.10⁻⁶ at 10°C, 25Hz) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 2 0/14 | Type to be stated | V _{min} 4 to V _{max} 9 (80 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P_{7.5} (≤7.5% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> S_{min}7,000 (≥ 7,000 MPa at 15°C, 10Hz or 0.02s) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> ε₅₋₁₀₀ (≥100.10⁻⁶ at 10°C, 25Hz) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 3 0/10 | Type to be stated | V _{min} 5 to V _{max} 10 (60 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P₅ (≤5% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> S_{min}7,000 (≥ 7,000 MPa at 15°C, 10Hz or 0.02s) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> ε₅₋₁₀₀ (≥100.10⁻⁶ at 10°C, 25Hz) V_i = 5% - V_s = 8% |
| BBSG 3 0/14 | Type to be stated | V _{min} 4 to V _{max} 9 (80 gyrations) | ITSR ₇₀ | <ul style="list-style-type: none"> P₅ (≤5% - 60°C and 30,000 cycles) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> S_{min}7,000 (≥ 7,000 MPa at 15°C, 10Hz or 0.02s) V_i = 5% - V_s = 8% | <ul style="list-style-type: none"> ε₅₋₁₀₀ (≥100.10⁻⁶ at 10°C, 25Hz) V_i = 5% - V_s = 8% |

** Water sensitivity NF EN 12697-12. Bituminous mixtures - Test methods for hot mix asphalt - Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens. The European version of November 2003 contains some inaccuracies that may affect the results and is currently being revised so that it includes a compression method derived from the standard NF P 98-251-1 (September 2002) Essais relatifs aux chaussées - Essais statiques sur mélanges hydrocarbonés - Partie 1 : Essai DURIEZ sur mélanges hydrocarbonés à chaud (Test relating to pavements - Static test on bituminous mixtures - Part 1: DURIEZ test on hot-mix).
Until the revised version is published it is strongly recommended to use the second of these standards in order to characterize water sensitivity.

Pela comparação das tabelas verifica-se que a abordagem empírica fixa uma percentagem de betume mínima, não sendo esta necessária na abordagem fundamental, por outro lado a abordagem fundamental fixa valores para os ensaios de módulo de rigidez e fadiga.

Existem diferenças consideráveis, mas também muitas semelhanças, entre os ensaios realizados em França e os ensaios realizados em Portugal, muito embora a finalidade /objetivo da realização dos ensaios seja a mesma. Assim, na Tabela 6.4 apresenta-se a comparação entre os ensaios usados nas formulações em Portugal e França:

Tabela 6.4- Comparação entre os ensaios usados nas formulações em Portugal e França

| Ensaio | Portugal | França |
|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Baridade Máxima Teórica | EN 12697-5, Método A em água | EN 12697-5, Método A, em água |
| Compactação dos provetes | EN 12697-30, Compactador de impacto com pedestal em madeira | EN 12697-31, compactador giratório |
| Sensibilidade à água | EN 12697-12, Método A, 15°C | EN 12697-12, não definido |
| Ensaio de pista | EN 12697-22, equipamento pequeno, ao ar, 60°C | EN 12697-22, equipamento grande, ao ar condições de ensaio específicas |
| Módulo de rigidez | EN 12697-26, Anexo B provetes prismáticos, aplicação da carga em 4 pontos | EN 12697-26, Anexo A provetes trapezoidais ou prismáticos, aplicação da carga em 2 pontos e Anexo E provetes cilíndricos ou prismáticos, aplicação da carga direta |
| Ensaio de fadiga | EN 12697-24, Anexo D provetes prismáticos, aplicação da carga em 4 pontos | EN 12697-24, Anexo A, provetes trapezoidais, aplicação da carga em 2 pontos |

Os parâmetros passíveis de comparação são a baridade, a porosidade e o VMA por serem comuns aos dois métodos de formulação. No entanto, os provetes compactados são obtidos por diferentes métodos de compactação. Poderão existir divergências entre resultados advindos desta diferença.

6.3 Análise Económica

Neste item irá ser analisada a relação custo/benéfico do uso de cada uma das abordagens. Os preços apresentados são reais, praticados por laboratórios acreditados.

Já foi descrito em detalhe no item anterior o que cada uma das abordagens incluía. Muito resumidamente sabemos que ambas as abordagens terão que incluir todos os requisitos gerais e alguns outros. Assim:

Tabela 6.5-Comparação entre abordagens

| Requisito | Abordagem empírica | Abordagem fundamental |
|----------------------------------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Composição e granulometria | x | x |
| Porosidade | x | x |
| Revestimento e homogeneidade | x | x |
| Sensibilidade à água | x | x |
| Resistência à deformação permanente | x | x |
| Temperatura da mistura | x | x |
| Durabilidade | x | x |
| Vazios Preenchidos com Betume e Vazios na Mistura de Agregados | x | |
| Aditivos | x | |
| Módulo de rigidez | | x |
| Ensaio de fadiga | | x |

Os requisitos solicitados a mais pela abordagem empírica, são praticamente desprezáveis a nível de económico, uma vez que o requisito “aditivo” é meramente descritivo, ou seja não tem que se realizar nenhum ensaio e o requisito “Vazios Preenchidos com Betume e Vazios na Mistura de Agregados” é um ensaio que se obtém de dois cálculos relativamente simples, onde toda a informação necessária para os obter foi adquirida anteriormente pelos requisitos gerais.

Já na abordagem fundamental há alguns custos envolvidos na realização dos ensaios necessários (fadiga e rigidez). Estes ensaios são relativamente caros devido à morosidade dos mesmos e ao preço do equipamento de ensaio.

De uma forma mais detalhada podemos descrever a formulação das misturas betuminosas, de acordo com o método Marshall, com os seguintes ensaios:

Tabela 6.6- Estimativa de preço para os ensaios usados na Formulação Marshall

| Ensaio | Quantidades | Preço Unitário (€) | Valor (€) |
|------------------------------------|-------------|--------------------|----------------|
| Preparação dos provetes | 5x4 | 18,00 | 360,00 |
| Marshall | 5 | 120,00 | 600,00 |
| Baridades dos provetes compactados | 5x4 | 10,00 | 200,00 |
| Porosidade | 5 | 5,00 | 25,00 |
| Baridade Máxima Teórica | 5 | 35,00 | 175,00 |
| Índice de Resistência Conservada | 1 | 100,00 | 100,00 |
| Total | --- | --- | 1460,00 |

Deve-se ainda cumprir os requisitos gerais e incluir na formulação os ensaios de sensibilidade à água e pista, realizados sobre a percentagem ótima em betume obtida no estudo de formulação (o CE da IP refere que complementarmente, deve-se efetuar um estudo adicional em que, após o estudo inicial anterior, sejam realizados ensaios de pista e de sensibilidade à água sobre três misturas betuminosas: uma com a percentagem de betume ótima determinada pelo método uma com a percentagem de betume igual ao valor ótimo -0,5 % e outra com uma percentagem de betume igual ao valor ótimo + 0,5 % (Estradas de Portugal, 2014)):

Tabela 6.7- Estimativa de preço dos ensaios de sensibilidade à água e Pista

| Ensaio | Quantidades | Preço Unitário (€) | Valor (€) |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|--------------------|---------------|
| Preparação dos provetes | 6 | 18,00 | 108,00 |
| Sensibilidade à água | 1 | 120,00 | 120,00 |
| Baridades dos provetes compactados | 6 | 10,00 | 60,00 |
| Ensaio de Resistência às deformações Permanentes – ensaio de pista | 1 | 300,00 | 300,00 |
| Total | --- | --- | 588,00 |

Como foi dito anteriormente, os restantes ensaios para terminar a abordagem empírica não têm peso relevante no estudo. Assim, pela abordagem empírica estima-se que o valor total do estudo ficaria por 2048,00 €.

Já pela abordagem fundamental teremos que adicionar dois ensaios: a rigidez e a fadiga. Assim, se realizarmos os ensaios acima descritos e incluirmos os ensaios necessários à abordagem fundamental:

Tabela 6.8 – Estimativa de preço de ensaios adicionais usados pela abordagem fundamental

| Ensaio | Quantidades | Preço Unitário (€) | Valor (€) |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------|
| Fabrico de misturas em laboratório | 1 | 150,00 | 150,00 |
| Preparação dos provetes para o ensaio módulo de rigidez e ensaio de fadiga | 1 | 150,00 | 150,00 |
| Serragem dos provetes | 28 | 10,00 | 280,00 |
| Módulo de rigidez | 1 | 300,00 | 300,00 |
| Ensaio de Fadiga | 1 | 1200,00 | 1200,00 |
| Total | --- | --- | 2080,00 |

Em resumo, teremos o estudo de formulação pela abordagem empírica por 2048,00€ e o estudo de formulação pela abordagem fundamental com um total de 4128,00€. Ou seja, o estudo pela abordagem fundamental requer um conjunto de ensaios que tem um custo duplo do da abordagem empírica.

Em síntese, a diferença em termos económicos entre a abordagem empírica e fundamental é a realização ou não dos ensaios de rigidez e fadiga e a sua interpretação de modo a ser revertida essa informação no dimensionamento do pavimento. Coloca-se a questão da importância da realização destes ensaios.

O fenómeno de fadiga das misturas betuminosas origina o fendilhamento das misturas betuminosas por passagem repetida das cargas do tráfego. Esta será a principal degradação que ocorre nos pavimentos rodoviários (Pais, et al., 2010). Sucintamente, com os ensaios de fadiga e rigidez conseguimos prever o comportamento do pavimento ao longo da sua vida útil.

A importância da previsão deste comportamento associa-se essencialmente, ao tipo de pavimento construído - relevância da obra, conforme se trate de uma estrada municipal ou uma autoestrada, ao tipo de tráfego associado (muito tráfego de veículos pesados) e à vida útil prevista para o pavimento.

Ao aplicarmos a abordagem fundamental em determinado estudo, estaremos à partida a gastar mais algum valor comparativamente à abordagem empírica, mas estaremos a otimizar o estudo e a precaver problemas futuros, através da aceitação ou não de determinadas características obtidas pelos ensaios adicionais.

6.4 Considerações finais

Neste capítulo fez-se a descrição da abordagem empírica e fundamental de acordo com a norma de produto EN 13108-1. Item por item verificaram-se as diferenças entre as duas abordagens. Pode dizer-se que os determinados RF, nomeadamente a granulometria da mistura e percentagem em betume, são consideravelmente mais permissivos que os RE. Verifica-se que alguns ensaios são mencionados no AN, ou que se encontram na norma de produto como requisito geral (logo devem ser declarados independentemente, quer se faça a formulação pela abordagem empírica ou fundamental), mas também nos cadernos de encargos não definindo um valor mínimo/limite, logo ficando ao critério de cada fiscalização a imposição (ou não) destes valores, o que pode conduzir a várias discussões e/ou muitas interpretações.

Foi feita a descrição de como se formulam misturas betuminosas em França. Consoante as características da obra, localização clima e tipo de tráfego - vulgo importância de obra, aplicam-se diferentes métodos e/ou abordagens.

O exemplo dado pressupõe uma experiência superior à nacional. Existem parâmetros limite definidos em características que ainda não há experiência nacional para a imposição de valores – limite ou valores tipo. O trabalho desenvolvido em França permite, em primeiro lugar uma maior economia, uma vez que não serão realizados ensaios sem se ter uma boa base de fundamentação e podendo comparar estes com valores pré estabelecidos e em segundo lugar uma maior confiança no trabalho obtido, uma vez que pode seguir uma “chave dicotómica”, já muito experimentada, para a obtenção do produto final.

Foi realizada uma análise económica para as abordagens empírica e fundamental, descritas no capítulo 6.1. do qual é concluído que o estudo pela abordagem fundamental, tendo em conta os valores presentes na presente dissertação e sensivelmente o dobro da abordagem fundamental.

7. Conclusões

O desenvolvimento deste trabalho tinha por objetivo fazer uma análise aos métodos de formulação usados pelo IP e Brisa. Esses resultados foram apresentados no final do capítulo 3. Foram comparados os fusos granulométricos dos Cadernos de Encargos do IP e Brisa (capítulo 5). Finalmente fez-se uma avaliação à abordagem empírica e fundamentais definidas pela norma de produto NP EN 13108-1 e pelo anexo nacional. No capítulo 4 são apresentados os ensaios que frequentemente são usados nas formulações de misturas betuminosas e outros ensaios que ainda não são correntemente usados mas que o possam vir a ser num futuro próximo. Embora ao longo desta dissertação tenham sido apresentadas conclusões relativas aos trabalhos realizados, apresentam-se seguidamente de forma sumária as conclusões que se consideram mais importantes.

Conforme descrito na norma de produto NP EN 13108-1, Portugal deve caminhar para a formulação de misturas betuminosas pela abordagem fundamental. Ainda há um grande caminho a percorrer. As infraestruturas de Portugal que normalmente é uma referência a nível nacional ao nível de caderno de encargos, ainda não contempla, valores mínimos/ limite para parâmetros tão significativos como a sensibilidade à água ou ensaio de pista. Embora os ensaios sejam solicitados não há uma imposição mínima destes parâmetros.

A curto prazo terão de ser realizadas várias decisões essenciais derivadas da imposição de valores mínimos/limites de certos parâmetros que são exigidos pela abordagem empírica. Uma não decisão pode acarretar consequências gravosas. Se a determinado parâmetro não é imposto um limite, como argumentar que a mistura betuminosa não serve para determinada camada, isto numa situação de planeamento de obra, ou pior, já numa situação em que o pavimento já se encontra em serviço, aparecem patologias porque determinado parâmetro não foi avaliado como argumentar a sua substituição? Uma questão para refletir.

Os requisitos empíricos apenas apresentam mais dois parâmetro para serem avaliados dos que os requisitos gerais. Eles são: Aditivos (tipo e quantidade de aditivos na mistura betuminosa) e Vazios Preenchidos com Betume (VFB) e Vazios na Mistura de Agregados (VMA). Embora Portugal tenha adotado a abordagem empírica, o AN não faz referência ao último parâmetro: Vazios Preenchidos com Betume e Vazios na Mistura de Agregados. É desconhecida a razão desta omissão. No entanto o CE da IP identifica valores mínimos de VMA para as diversas misturas.

De igual modo, os requisitos fundamentais apresentam mais dois parâmetros para serem avaliados que os requisitos gerais. A rigidez e a fadiga. O CE da IP não faz referência ao uso de nenhum destes ensaios. Por outro lado, a Brisa já faz exigências desta natureza para as camadas de Base e vai mais além, impondo valores mínimos. De salientar que estes dois parâmetros são avaliados pela Brisa por duas normas que não são as de referência a nível europeu (logo são diferentes das constantes na norma de produto NP EN 13108-1). Não é do âmbito desta tese a comparação entre ensaios semelhantes realizados por normas de ensaio diferentes.

Em síntese, verifica-se que o método de formulação pela abordagem empírica, praticado em Portugal é resultante um grande conhecimento e experiência na sua utilização, o que leva a que o comportamento da mistura possa ser mais facilmente previsto para misturas que usam agregados correntes. Conforme foi referido no capítulo 6.3, tem a vantagem de ser mais económico que o usado pela abordagem fundamental, uma vez que este último implica um número maior de ensaios. No entanto, se aplicarmos estes valores a uma grande empreitada, onde existe formulação a um grande número de misturas, chegamos à conclusão que se trata de um valor residual, comparado com o valor total da obra. A aplicação da abordagem fundamental nestes casos traz vantagens consideráveis.

É da minha opinião que deveremos, em semelhança ao praticado em França e abordado na presente tese, progredir para um uso de níveis de importância de obra para definir o tipo de formulação a aplicar “caso a caso”, à semelhança do que se faz em França. Estaremos deste modo a usar os recursos económicos de uma maneira mais inteligente. Considera-se relevante dar um passo em frente e avançar para a abordagem fundamental, quando houver razão para tal, trazendo com isto algum desconhecimento, ao início, mas vantagens a médio/longo prazo.

Como trabalhos futuros proponho que seja feita a sistematização de níveis de uso de formulação de misturas betuminosas, para as condições climáticas, tráfego, recursos materiais, etc. encontradas no nosso país.

Referências Bibliográficas

472 Especificação LNEC. 2009. *Guia para a reciclagem de misturas betuminosas a quente em central.* Lisboa : Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2009.

Antunes, Maria de Lurdes. <http://www.crp.pt>. *Centro Rodoviário Português.* [Online] [Citação: 4 de Agosto de 2016.] http://www.crp.pt/docs/A25S2-02_Maria_de_Lurdes_Antunes.pdf.

BRISA. 2013. *Empreitadas para as obras de beneficiação/reforço do pavimento no sublanço Coimbra Sul/Coimbra Norte da A1- Autoestrada do Norte. Cláusulas técnicas gerais. Capítulo 3 - Pavimentação.* 2013.

Capitão, S.D. 2003. *Caracterização Mecânica de misturas betuminosas de alto módulo de deformabilidade.* Coimbra : Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da UC para a obtenção do grau de Doutor em Eng.ª Civil, 2003.

Capitão, S.D., Picado Santos, L.G. e Pais, J.C. 2001. *Estabelecimento de misturas betuminosas para camadas estruturalmente importantes da formulação analítica à composição final.* Lisboa : Jornadas de estradas e pontes dos países de Língua Portuguesa, 2001.

Capitão, Silvino Dias, Picado Santos, Luís e Pais, Jorge. 2004. *Deformabilidade, Comportamento à Fadiga e Resistência à Deformação Permanente De Misturas Betuminosas De Alto Módulo Para Camadas de Base.* [Online] 2004. [Citação: 24 de Agosto de 2016.] http://www.crp.pt/docs/A11S96-pavimentos_05.pdf.

Domingues Silva, Andrea. 2014. *Formulação de misturas betuminosas a quente: análise comparativa da aplicação de métodos empíricos e volumétricos.* Coimbra : ISEC, 2014. http://files.isec.pt/DOCUMENTOS/SERVICOS/BIBLIO/Teses/Tese_Mest_Andrea_Silva.pdf.

Estradas de Portugal, S.A. 2014. Caderno de Encargos Tipo Obra. 14.03 - *Pavimentação, Características dos materiais.* 2014.

Estradas de Portugal, S.A. 2014. Caderno de Encargos Tipo Obra. 15.03 - *Pavimentação, Métodos construtivos.* Estradas de Portugal, S.A. 2014.

Francken, L. 1998. *Bituminous Binders and Mixes. State of the art and interlaboratory tests on mechanical behaviour and mix design, report of the RILEM technical committee 152- PBM - Performance of bituminous materials .* United Kindom. URL: <http://worldcat.org/isbn/0419228705> : s.n., 1998.

Inlr. Disposições Normativas. *Instituto de Infraestruturas Rodoviárias.* [Online] [Citação: 2 de Junho de 2016.] <http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgaao%20Tcnica/DiretivasConstrucaoPavimentosCriteriosDimensionamento.pdf>.

Institut fur Materialprufung, Bauberatung und Analytik. Presse à cisaillement giratoire PCG. *impbautest.* [Online] [Citação: 22 de Junho de 2016.] <http://www.impbautest.ch/upload/cms/user/giratoire.pdf>.

IPQ. Catálogo de Documentos Normativos. *Instituto Português da Qualidade.* [Online] [Citação: 18 de Maio de 2016.] <http://www1.ipq.pt/PT/site/clientes/pages/pesquisarnormas.aspx>.

LGMC. 2016. Controlo de qualidade, Agregados. Avioso S.Pedro : CICCOPN, 2016.

LNEC. 1962. *Vocabulário de estradas e aeródromos : especificação E1-1962.* Lisboa : LNEC, 1962.

Murtinheira, Filipe Miguel Figueiredo. 2011. *Reabilitação estrutural de pavimentos rodoviários. Correção do módulo de deformabilidade das camadas betuminosas.* Viseu : Instituto Politécnico de Viseu, 2011.

Neves, J. M. e Correia, A. G. *Caracterização da rigidez de misturas betuminosas em ensaios de tracção indirecta por compressão diametral de provetes cilíndricos.* [Online] [Citação: 24 de Agosto de 2016.]

Neves, José M. C. e Gomes Correia, A. 2006. *Caracterização da Rigidez de Misturas Betuminosas em Ensaio de tração Indirecta por Compressão Diametral de Provetes Cilíndricos.* Lisboa, Guimarães : Universidade do Minho, 2006.

Oliveira, Sara Dias. www.publico.pt. [Online] [Citação: 4 de Agosto de 2016.]
<https://www.publico.pt/economia/noticia/para-a-harsco-a-escoria-e-um-negocio-solido-1714385>.

Pais, J.C. e Palha, C. A. F. 2010. *RESISTÊNCIA À FADIGA EM MISTURAS BETUMINOSAS PARA PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS.* Guimarães : s.n., 2010.
https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/16382/1/CN-45_Resist%C3%A0ncia%20C3%A0%20fadiga%20em%20misturas%20betuminosas%20para%20pavimentos%20rodovi%C3%A1rios.pdf.

Picado Santos, L. 2013. *Formulação de Misturas Betuminosas.* Slides de apresentação da disciplina de Vias de comunicação do Mestrado Integrado em Engenharia Civil e Arquitetura do Instituto Superior Técnico, https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/736819/1/VC_Misturas%20Betuminosas : s.n., 2013.

Picado Santos, L. 2008. *Consideração da temperatura no dimensionamento de pavimentos rodoviários flexíveis.* Coimbra : Dissertação submetida à Faculdade de Ciências e Tecnologia da UC para obtenção do grau de Doutor em Eng.ª Civil, 2008.

Picado Santos, L., Branco, F. e Pereira, P. . 2006. *Pavimentos Rodoviários.* Coimbra : Almedina, 2006.

Picado Santos, Luis. 2001. Estabelecimentos de misturas betuminosas para camadas estruturalmente importantes da formulação analítica à composição Final. s.l. : Jornadas de estradas e pontes dos países de Língua Portuguesa, 2001.

Pimentel, Almeida, C.A. 2013. *Formulação de misturas betuminosas a quente. Contribuição para um novo método de formulação.* Lisboa : Dissertação de Tese de Mestrado, 2013. Vol.
[file:///C:/Users/Joana%20Rita/Downloads/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Carlos%20Pimentel_21207656%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/Joana%20Rita/Downloads/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Carlos%20Pimentel_21207656%20(2).pdf).

Portugal, Infraestruturas de. 2010. *Infraestruturas de Portugal. infraestruturasdeportugal.* [Online] 2010. <http://www.infraestruturasdeportugal.pt/rede/rodoviaria>.

Sétra, service d'Études techniques des routes et autoroutes. 2008. *The use of standards for hot mixes- Technical Guide.* Paris : s.n., 2008. 0840A - ISRN: EQ-SETRA--08-ED22—FR+ENG.

Silva, Hugo Manuel Ribeiro Dias da. 2006. *Caracterização do mastique betuminoso e da ligação agregado mastique. Contribuição para o estudo do comportamento das misturas betuminosas.* Tese de Doutoramento : URL:<http://hdl.handle.net/1822/5981>, 2006.

www.imtt.pt. <http://www.imtt.pt/sites/IMTT/Portugues/InfraestruturasRodoviaras/InovacaoNormalizacao/Divulgao%20Tcnica/DiretivasConstrucaoPavimentosCriteriosDimensionamento.pdf>. [Online]
[Citação: 4 de Agosto de 2016.]

REFERÊNCIAS NORMATIVAS

NP EN 13108-1, *Misturas Betuminosas — Especificações dos Materiais — Part 1: Betão Betuminoso.*

NP EN 13043, *BAgregados para misturas betuminosas e tratamentos superficiais para estradas, aeroportos e outras áreas de circulação.*

EN 12697-1, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 1: Soluble binder content*

EN 12697-2, *Bituminous mixtures — Test methods — Part 2: Determination of particle size distribution*

EN 12697-3, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 3: Bitumen recovery: Rotary evaporator*

EN 12697-5, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 5: Determination of the maximum density*

EN 12697-6, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 6: Determination of bulk density of bituminous specimens*

EN 12697-8, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 8: Determination of void characteristics of bituminous specimens*

EN 12697-11, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 11: Determination of the affinity between aggregate and bitumen*

EN 12697-12, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 12: Determination of the water sensitivity of bituminous specimens*

EN 12697-13, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 13: Temperature measurement*

EN 12697-22, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 22: Wheel tracking*

EN 12697-23, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 23: Determination of the indirect tensile strength of bituminous specimens*

EN 12697-24, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 24: Resistance to fatigue*

EN 12697-26, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 26: Stiffness*

EN 12697-27, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 27: Sampling*

EN 12697-28, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 28: Preparation of samples for determining binder content, water content and grading*

EN 12697-29, *Bituminous mixtures — Test method for hot mix asphalt — Part 29: Determination of the dimensions of a bituminous specimen*

EN 12697-30, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 30: Specimen preparation by impact compactor*

EN 12697-31, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 31: Specimen preparation by gyratory compactor*

EN 12697-33, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 33: Specimen prepared by roller compactor*

EN 12697-34, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 34: Marshall test*

EN 12697-35, *Bituminous mixtures — Test methods — Part 35: Laboratory mixing*

EN 12697-36, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 36: Determination of the thickness of a bituminous pavement*

EN 12697-38, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 38: Common equipment and calibration*

EN 12697-39, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 39: Binder content by ignition*

EN 12697-41, *Bituminous mixtures — Test methods for hot mix asphalt — Part 41: Resistance to de-icing fluids*

MIL STD- 620A , *Military Standard: Test Methods for bituminous paving material*

ANEXO I

Quadros do AN e norma de produto

Anexo I 1 - Fusos granulométricos para as misturas betuminosas (quadro 2 do AN)

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

Anexo I 2 - Percentagens de betume mínimas para as misturas betuminosas (Quadro 3 do AN)

| Camada | Designação anterior | Designação atual | Percentagem de betume (valor mínimo indicativo) |
|---------------|-----------------------------------|---------------------------|----------------------------------------------------|
| Base | Macadame betuminoso Fuso B | AC 32 base ligante (MB) | 4,0 |
| | Macadame betuminoso Fuso A | AC 20 base ligante (MB) | 4,4 |
| | Mistura Betuminosa de Alto Módulo | AC 20 base ligante (MBAM) | 5,0 |
| Ligação | Macadame betuminoso Fuso A | AC 20 bin ligante (MB) | 4,4 |
| | Mistura Betuminosa Densa | AC 20 bin ligante (MBD) | 4,8 |
| | Mistura Betuminosa de Alto Módulo | AC 16 bin ligante (MBAM) | 5,0 |
| | Betão betuminoso Subjacente | AC 20 bin ligante (BBsd) | 4,9 |
| Regularização | Macadame betuminoso Fuso A | AC 20 Reg ligante (MB) | 4,4 |
| | Mistura Betuminosa Densa | AC 20 Reg ligante (MBD) | 4,8 |
| | Mistura Betuminosa de Alto Módulo | AC 16 Reg ligante (MBAM) | 5,0 |
| | Betão betuminoso Subjacente | AC 14 Reg ligante (BBsb) | 4,9 |
| | Betão betuminoso | AC 14 Reg ligante (BB) | 4,9 |
| Desgaste | Betão betuminoso | AC 14 Surf ligante (BB) | 4,9 |
| | Betão betuminoso Rugoso | AC 14 Surf ligante (BBr) | 4,8 |
| | (micro) Betão betuminoso Rugoso | AC 10 Surf ligante (BBr) | 5,0 |

Anexo I 3 - Limites gerais do fuso granulométrico série base + série 2 (quadro 2 da NP EN 13108-1)

| D | 4 | 6 (6,3) | 8 | 10 | 12 (12,5) | 14 | 16 | 20 | 32 (31,5) |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|------------|------------|------------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------|
| Peneiro mm | Percentagem de material passado em massa | | | | | | | | |
| 1,4 D ^a | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| D | 90 a 100 | 90 a 100 | 90 a 100 | 90 a 100 | 90 a 100 | 90 a 100 | 90 a 100 | 90 a 100 | 90 a 100 |
| 2 | 50 a 85 | 15 a 17 | 10 a 72 | 10 a 60 | 10 a 55 | 10 a 50 ^b | 10 a 50 ^b | 10 a 50 ^b | 10 a 50 |
| 0,063 | 5,0 a 17,0 | 2,0 a 15,0 | 2,0 a 13,0 | 2,0 a 12,0 | 2,0 a 12,0 | 0 a 12,0 | 0 a 12,0 | 0 a 11,0 | 0 a 11,0 |
| ^a Quando o peneiro calculado como 1,4D não corresponder a uma das aberturas nominais dos peneiros ISO 565/R 20 deve ser usado o peneiro com abertura mais próxima. ^b Para aplicação em pavimentos de aeroportos a percentagem máxima de passados no peneiro 2 mm pode ser aumentada até 60% | | | | | | | | | |

Anexo I 4- Porosidade máxima, V_{max} (quadro 3 da NP EN 13108-1)

| Porosidade máxima % | Categoria |
|---------------------|--------------|
| 2,0 | V_{max} |
| 2,5 | V_{max2} |
| 3,0 | $V_{max2,5}$ |
| 3,5 | V_{max3} |
| 4,0 | $V_{max3,5}$ |
| 4,5 | V_{max4} |
| 5,0 | $V_{max4,5}$ |
| 5,5 | V_{max5} |
| 6,0 | $V_{max5,5}$ |
| 7,0 | V_{max6} |
| 8,0 | V_{max7} |
| 9,0 | V_{max8} |
| 10,0 | V_{max9} |
| 11,0 | V_{max10} |
| 12,0 | V_{max11} |
| 13,0 | V_{max12} |
| 14,0 | V_{max13} |
| Não requerido | V_{max14} |
| | V_{maxNR} |

Anexo I 5- Porosidade mínima, V_{min} (quadro 4 da NP EN 13108-1)

| Porosidade mínima % | Categoria |
|---------------------|---------------|
| 0,5 | V_{min} |
| 1,0 | $V_{min 0,5}$ |
| 1,5 | $V_{min 1,0}$ |
| 2,0 | $V_{min 1,5}$ |
| 2,5 | $V_{min 2,0}$ |
| 3,0 | $V_{min 2,5}$ |
| 3,5 | $V_{min 3,0}$ |
| 4,0 | $V_{min 3,5}$ |
| 4,5 | $V_{min 4,0}$ |
| 5,0 | $V_{min 4,5}$ |
| 5,5 | $V_{min 5,0}$ |
| 6,0 | $V_{min 5,5}$ |
| Não requerido | $V_{min 6,0}$ |
| | $V_{min NR}$ |

Misturas betuminosas a quente. Uma análise à abordagem empírica e fundamental da norma de produto

Anexo I 6 - Valor mínimo da resistência conservada em tração indireta, *ITSR*, (quadro 5 da NP EN 13108-1)

| Valor mínimo da resistência conservada em tração indireta % | Categoria <i>ITSR</i> |
|-------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 90 | <i>ITSR</i> ₉₀ |
| 80 | <i>ITSR</i> ₈₀ |
| 70 | <i>ITSR</i> ₇₀ |
| 60 | <i>ITSR</i> ₆₀ |
| Não requerido | <i>ITSR</i> _{NR} |

Anexo I 7- Resistência à deformação permanente, equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, declive máximo da rodeira, *WTS_{AIR}*, (quadro 8 da NP EN 13108-1)

| Declive máximo da rodeira, mm por 10 ³ ciclos de carga | Categoria <i>WTS_{AIR}</i> |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 0,03 | <i>WTS_{AIR0,03}</i> |
| 0,05 | <i>WTS_{AIR0,05}</i> |
| 0,07 | <i>WTS_{AIR0,07}</i> |
| 0,10 | <i>WTS_{AIR0,10}</i> |
| 0,15 | <i>WTS_{AIR0,15}</i> |
| 0,30 | <i>WTS_{AIR0,30}</i> |
| 0,40 | <i>WTS_{AIR0,40}</i> |
| 0,50 | <i>WTS_{AIR0,50}</i> |
| 0,60 | <i>WTS_{AIR0,60}</i> |
| 0,80 | <i>WTS_{AIR0,80}</i> |
| 1,00 | <i>WTS_{AIR1,00}</i> |
| Não requerido | <i>WTS_{AIRNR}</i> |

Anexo I 8- Resistência à deformação permanente, equipamento pequeno, procedimento B, acondicionamento ao ar, Profundidade máxima da rodeira, em percentagem, *PRD_{AIR}* (quadro 9 da NP EN 13108-1)

| Profundidade máxima da rodeira, em percentagem % | Categoria <i>PRD_{AIR}</i> |
|--------------------------------------------------|------------------------------------|
| 1,0 | <i>PRD_{AIR1,0}</i> |
| 1,5 | <i>PRD_{AIR1,5}</i> |
| 2,0 | <i>PRD_{AIR2,0}</i> |
| 3,0 | <i>PRD_{AIR3,0}</i> |
| 5,0 | <i>PRD_{AIR5,0}</i> |
| 7,0 | <i>PRD_{AIR7,0}</i> |
| 9,0 | <i>PRD_{AIR9,0}</i> |
| Não requerido | <i>PRD_{AIRNR}</i> |

Anexo I 9 - Limites da temperatura da mistura (quadro 11 NP EN 13108-1)

| Gama de penetração do ligante | Temperatura °C |
|-------------------------------|----------------|
| 20/30 | 160 a 200 |
| 30/45 | 155 a 195 |
| 35/50, 40/60 | 150 a 190 |
| 50/70, 70/100 | 140 a 180 |
| 100/150, 160/220 | 130 a 170 |
| 250/330, 330/430 | 120 a 160 |

Anexo I 10 - Intervalos entre os valores máximos e mínimos para o fuso granulométrico selecionado (quadro 12 NP EN 13108-1)

| Peneiro mm | Intervalos % por massa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| D | 10 |
| Peneiro característico intermédio | 10 a 30 ^a |
| Peneiro extra opcional entre D e 2 | 10 a 30 ^a |
| 2 | 5 a 25 ^a |
| Peneiro característico intermédio | 4 a 25 ^a |
| Peneiro extra opcional entre 2 e 0,063 | 4 a 25 ^a |
| 0,063 | 2 a 12 ^a |
| ^a valor a ser selecionado entre os valores mínimo e máximo indicado (ambos incluídos) | |

Anexo I 11 - Percentagem mínima de ligante (quadro 13 da NP EN 13108-1)

| Percentagem mínima de ligante % por massa | Categoria B_{min} |
|----------------------------------------------|------------------------|
| 3,0 | $B_{min3,0}$ |
| 3,2 | $B_{min3,2}$ |
| 3,4 | $B_{min3,4}$ |
| 3,6 | $B_{min3,6}$ |
| 3,8 | $B_{min3,8}$ |
| 4,0 | $B_{min4,0}$ |
| 4,2 | $B_{min4,2}$ |
| 4,4 | $B_{min4,4}$ |
| 4,6 | $B_{min4,6}$ |
| 4,8 | $B_{min4,8}$ |
| 5,0 | $B_{min5,0}$ |
| 5,2 | $B_{min5,2}$ |
| 5,4 | $B_{min5,4}$ |
| 5,6 | $B_{min5,6}$ |
| 5,8 | $B_{min5,8}$ |
| 6,0 | $B_{min6,0}$ |
| 6,2 | $B_{min6,2}$ |
| 6,4 | $B_{min6,4}$ |
| 6,6 | $B_{min6,6}$ |
| 6,8 | $B_{min6,8}$ |
| 7,0 | $B_{min7,0}$ |
| 7,2 | $B_{min7,2}$ |
| 7,4 | $B_{min7,4}$ |
| 7,6 | $B_{min7,6}$ |
| 7,8 | $B_{min7,8}$ |
| 8,0 | $B_{min8,0}$ |

Anexo I 12 - Valor mínimo de vazios preenchidos com betume, VFB_{min} (quadro 18 da NP EN 13108-1)

| Valor mínimo de vazios com betume % | Categoria VFB_{min} |
|----------------------------------------|--------------------------|
| 50 | VFB_{min50} |
| 55 | VFB_{min55} |
| 60 | VFB_{min60} |
| 65 | VFB_{min65} |
| 70 | VFB_{min70} |
| 72 | VFB_{min72} |
| 75 | VFB_{min75} |
| 78 | VFB_{min78} |
| Não requerido | VFB_{minNR} |

Misturas betuminosas a quente. Uma análise à abordagem empírica e fundamental da norma de produto

Anexo I 13 - Valor máximo de vazios preenchidos com betume, $VFB_{máx}$, (quadro19 NP EN 13108-1)

| Valor máximo de vazios com betume % | Categoria VFB_{max} |
|-------------------------------------|-----------------------|
| 50 | VFB_{max50} |
| 53 | VFB_{max53} |
| 56 | VFB_{max56} |
| 59 | VFB_{max59} |
| 62 | VFB_{max62} |
| 65 | VFB_{max65} |
| 68 | VFB_{max68} |
| 71 | VFB_{max71} |
| 74 | VFB_{max74} |
| 77 | VFB_{max77} |
| 80 | VFB_{max80} |
| 83 | VFB_{max83} |
| 86 | VFB_{max86} |
| 89 | VFB_{max89} |
| 93 | VFB_{max93} |
| 97 | VFB_{max97} |
| Não requerido | VFB_{maxNR} |

Anexo I 14 - Valor mínimo de vazios na mistura de agregados, VMA_{min} (Quadro 20 da NP EN 13108-1)

| Valor mínimo de vazios na mistura de agregados % | Categoria VMA_{min} |
|--------------------------------------------------|-----------------------|
| 8 | VMA_{min8} |
| 10 | VMA_{min10} |
| 12 | VMA_{min12} |
| 14 | VMA_{min14} |
| 16 | VMA_{min16} |
| 18 | VMA_{min18} |
| Não requerido | VMA_{minNR} |

Anexo I 15 - Valor mínimo da rigidez, S_{min} , (quadro 22 da NP EN 13108-1)

| Valor mínimo da rigidez MPa | Categoria S_{min} |
|-----------------------------|---------------------|
| 21 000 | $S_{min 21 000}$ |
| 17 000 | $S_{min 17 000}$ |
| 14 000 | $S_{min 14 000}$ |
| 11 000 | $S_{min 11 000}$ |
| 9 000 | $S_{min 9 000}$ |
| 7 000 | $S_{min 7 000}$ |
| 5 500 | $S_{min 5 500}$ |
| 4 500 | $S_{min 4 500}$ |
| 3 600 | $S_{min 3 600}$ |
| 2 800 | $S_{min 2 800}$ |
| 2 200 | $S_{min 2 200}$ |
| 1 800 | $S_{min 1 800}$ |
| 1 500 | $S_{min 1 500}$ |
| Não requerido | $S_{min NR}$ |

Anexo I 16 - Valor máximo da rigidez, $S_{máx}$, (quadro 23 da (NPEN13108-1, CEN, 2008))

| Valor máximo da rigidez MPa | Categoria S_{max} |
|-----------------------------|---------------------|
| 30 000 | $S_{max 30 000}$ |
| 25 000 | $S_{max 25 000}$ |
| 21 000 | $S_{max 21 000}$ |
| 17 000 | $S_{max 17 000}$ |
| 14 000 | $S_{max 14 000}$ |
| 11 000 | $S_{max 11 000}$ |
| 9 000 | $S_{max 9 000}$ |
| 7 000 | $S_{max 7 000}$ |
| Não requerido | $S_{max NR}$ |

Anexo I 17 - Resistência à fadiga, (quadro 25 da NP EN 13108-1)

| Resistência à fadiga, (x10 ⁶) | Categoria <i>e</i> ₆ |
|----------------------------------------------|------------------------------------|
| 310 | <i>e</i> ₆₋₃₁₀ |
| 260 | <i>e</i> ₆₋₂₆₀ |
| 220 | <i>e</i> ₆₋₂₂₀ |
| 190 | <i>e</i> ₆₋₁₉₀ |
| 160 | <i>e</i> ₆₋₁₆₀ |
| 130 | <i>e</i> ₆₋₁₃₀ |
| 115 | <i>e</i> ₆₋₁₁₅ |
| 100 | <i>e</i> ₆₋₁₀₀ |
| 90 | <i>e</i> ₆₋₉₀ |
| 80 | <i>e</i> ₆₋₈₀ |
| 70 | <i>e</i> ₆₋₇₀ |
| 60 | <i>e</i> ₆₋₆₀ |
| 50 | <i>e</i> ₆₋₅₀ |
| Não requerido | <i>e</i> _{6-NR} |